

ブロードバンドを 塗り替える、 それが…

それが「OFDM」である。この変調方式は、厳しい環境でも安定した高速通信を可能とする。無線LAN、デジタル放送、次世代ケータイ…。ブロードバンドやユビキタス・ネットを実現するのに欠かせないこうした通信サービスで、OFDMへの転換が一気に進み始めた。

第1部 一気に開花するOFDM ネット家電に必須の技術に	102
第2部 いざ第4世代へ ケータイに向け歩を速める	113
第3部 パワー・アンプを制する者が 5GHz帯無線LANを制す	120

(田中 正晴、蓬田 宏樹)

第1部

OFDM

一気に開花するOFDM ネット家電に必須の技術に

—昔前まではデジタル放送のための変調技術にすぎなかったOFDM—。

それが一気に応用範囲を広げ、大変な勢いで開花し始めた。

無線LANやDSL、高速電力線モジュムなど

今やブロードバンドやユビキタス・ネットを実現する

ほとんどの通信手段で使われ始めている。

デジタル家電といった機器のネットワーク対応を進める上で

ぜひとも押さえなければならない技術になった。

無線LANや地上波デジタル放送、
ADSL[†]、いわゆる第4世代携帯電話など、異なるブロードバンド通信方式を

次々に制覇しつつある技術基盤がある。
それが、多くの搬送波を巧みに使う変
調方式「OFDM (orthogonal frequency

division multiplex : 直交周波数分割多
重)」である。

この変調技術に注目しているのは、

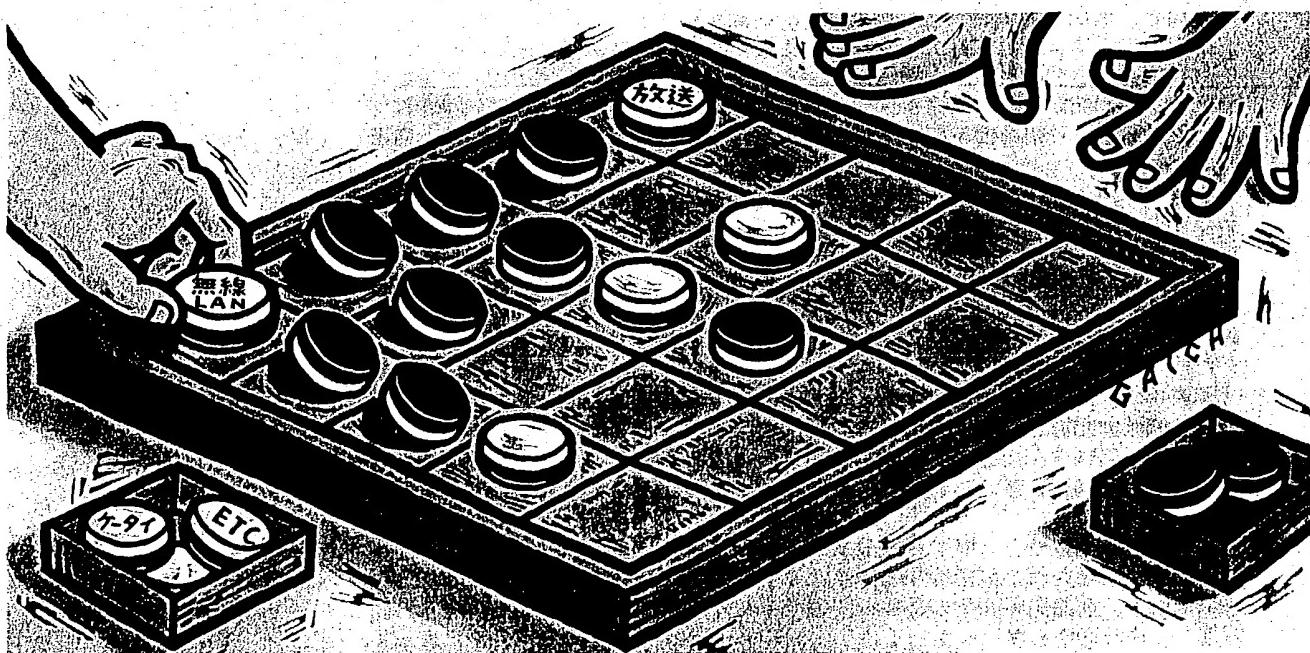


図1 時代はOFDM、ネットワーク技術の主流へ
OFDMは、山岳やビルなどに電波が反射してマルチパス干渉を起こすなど厳しい条件下でも高速通信できることが強み。まず地上波デジタル放送で実用化された。そして、今まさに「無線LANのOFDM化」も始まった。これらの用途が、OFDM関連の部品コストを下げる。そして、それ以外の通信技術をどんどん塗り替えていく。(イラスト:村松ガイチ)

通信事業者や放送会社だけではない。AV機器メーカーや情報機器メーカーも血眼になって研究開発を進めている。「屋外でクルマに乗りながらも、高速なインターネット接続サービスを受けられる機器を作りたい」「音声や静止画だけでなく、HDTV（high definition television）など大容量のデータもスマートに送れる機能を実現したい」といった場合に、圧倒的な強みを發揮するからだ。

OFDMの強みの源泉は、データをたくさんの搬送波で分担して伝送すること。ここから、全体では高速でも、個々の搬送波を見ると低速で頑丈な通信と変わらないというOFDMの強さがわき出てくる（pp. 110-112の「変調方式OFDMを理解する、「分けて寄せる」がポイント」参照）。

OFDMは、この強みを武器に、ありとあらゆる通信に浸透し始めている。あたかもオセロ・ゲームで1枚のコマが一気に形成を逆転させるシーンを思い起こさせるような事態が、まさに今、進行中なのである（図1）。

OFDMで差をつけろ

実際、OFDMのこの利点を、機器やサービスに生かそうという動きが続々と具体化してきた。

例えば2002年3月、米Ricoh Corp.（リコーの米国法人）は、デジカメにOFDMによる無線アクセスの送受信モジュールを搭載したデモンストレーションを米国で実施した^(注1)。撮影した画像をその場でインターネットを経由して遠隔地のパソコンに転送したり、デジカメに搭載するモニタにWWWブラウザの画面を表示できる。最大データ伝送速度は3Mビット/秒と高速だが、携帯電話のように通信料は気にならない。デジカメがたちまちにして無線ブロードバンド通信に対応する「ユビキタス・デジカメ」に化けたのである。

シャープやソニー、松下電器産業はそれぞれ、OFDMを使う5GHz帯の無線LANを経由して、HDTV画質のMPEGデータを通信するデモンストレーションを盛んに行っている。セットトップ・ボックスなどとディスプレイを無

線でつなごうという用途である。配線を気にせずに、電波が届く範囲内ならば、どこにいても液晶ディスプレイなどで手軽にテレビ放送を楽しむことができる。

流れに乗り、どんどん増殖中

この無線LANにおける実用化が、OFDMの適応分野の拡大を決定的にした（表1）。その勢いは、とどまるところを知らない。

例えば、高速道路などの料金回収を無線で実行するETC（料金自動収受システム）。国内では別的方式で始まったが、米国では物理層に、OFDMを使った5GHz無線LAN仕様「IEEE802.11a」をそのまま転用する方向で検討が進んでいる（図2）。

PAN（personal area network）と呼ばれる、数m程度の近距離で機器間の無線通信を実現しようという分野でも、OFDMを使う動きが出てきそうだ。具体的には、無線LANの規格化を担当するIEEE802.11と、Bluetoothの規格化を担当するIEEE802.15が合同で次世代の

表1 OFDMがブロードバンドとユビキタス・ネットワークを席巻する

無線 地上波デジタル放送	英国で、1998年に放送開始。欧洲標準に採用されており、今後各地で放送が始まることを開始する計画。その後、2006年をメドに全国展開する。米国ではBPSKという異なる方式を採用したが、携帯受信や移動受信に向くOFDMに転換すべきという声がいまだにこぼれている。
携帯電話	2010年をメドに実用化を予定する第4世代移動体通信システム（いわゆる4G）で、OFDMをベースにCDMAを組み合わせた方式の研究開発が盛んになっている。国内では、NTTドコモが2002年夏までに実験装置を試作し、接続試験を行う予定。
無線アクセス	IEEE802.16でOFDMを利用した方式の提案が相次ぐ。これとは別に、米国ではベンチャー企業が実用化に向けて各種方式の提案や、実験を進めている。
無線LAN	5GHz帯を利用するIEEE802.11a対応のLSIが続々登場し、一部で実用化が始まる。欧洲ではHiperLAN/2の仕様、国内ではマルチメディア移動アクセス推進協議会（MMAC）がHiSWANaとIEEE802.11a、Wireless1394の3つの仕様を策定した。2.4GHz帯については別方式でスタートしたが、IEEE802.11gでOFDMを利用する方式の検討が大詰めを迎えており、国内では、ソニーと日本テレコムがホットスポットを視野に入れて2.4GHz帯でOFDMを使った実証実験を始めた。
PAN（personal area network）	IEEE802.11とIEEE802.15（Bluetoothの規格化を担当）が合同で、近距離無線と無線LANを統合する仕様を検討する動きあり。この中でOFDMを推す意見も出てきそうだ。
ETC（自動料金収受システム）	国内でASK（振幅偏移変調）をベースにした仕様で実用化されているが、米国ではIEEE802.11aと物理層を共通化する方向で検討が進む。国内でも次世代はOFDMベースになる見通し。
放送用番組素材中継機	NTSC方式相当の画質のマラソン中継などでOFDMが実際に利用されている。2002年2月にはHDTV番組の素材伝送に向け、OFDM伝送の仕様が固まり公表された。
有線 DSL	ADSLで一般的に採用されているDMT（Discrete Multitone）変調は、OFDMのことである。NECは2002年3月、OFDMで伝送速度を最大51.2Mビット/秒に高めたVDSL（very high-bit-rate digital subscriber line）装置を開発した。
電力線モ뎀	数kビット/秒クラスで実用化が始まったが、OFDMを使って数Mビット/秒～数十Mビット/秒の伝送速度を達成する装置の開発が盛んに行われている。国内では住友電気工業、日立製作所、三菱電機などが装置を開発している。

Cover Story

(a) 無線LANの基地局



図2 OFDMの玉突き現象、無線LANが基点に5GHz帯の無線LANに向けたLSIや装置の開発が進む(a)。これに合わせて、他の無線応用分野でも、この無線LANと同じLSIを使うシステムを採用する動きが具体化し始めた。例えば、米国のC(自動料金収受システム)である。国内でも次世代ETCはOFDMになる見通しである。(a)は、NTTアクセスサービスシステム研究所が開発した5GHz帯利用無線LAN向け基地局。(b)は国内で実用化されたETC対応ゲートの例である。

(b) ETC対応ゲート



無線LAN仕様を検討する作業部会を新設した。同部会ではOFDMを使って、無線LANとPANを統合する仕様の策定も視野に入れている。

携帯電話でも、2010年ころの実用化を目指す、いわゆる第4世代携帯電話に向けて、OFDMをベースにCDMAと組み合わせる方式が盛んに検討されている(pp. 113-119の「いざ第4世代へ、ケータイに向かって歩を速める」参照)。

無線だけでなく、有線でもOFDMが躍進だ。ADSLでは、CAP[†]との競争に打ち勝って、DMT (Discrete Multitone) が変調方式の主流となった。実は、このDMTの名前の由来である複数のトーンはデータを運ぶ搬送波であり、それらは互いに直交関係になるように周波数に配置する。つまりDMTはOFDMそのものなのである。電力線モジュール、OFDM化が急激に進む。従来の数百kビット/秒品に対して、数十Mビット/秒といった高速品が登場している。こうした高速品のほとんどが、OFDMを使っている。

きっかけはデジタル・テレビ

もともと、OFDMの実用化に先鞭をつけたのは、地上波デジタル放送である。まず英国で1998年にOFDMによる放送が始まった。欧洲のデジタル放送に関する仕様であるDVB (Digital Video Broadcasting) でも、地上波デジタル放送の標準方式で採用されている。国内では、2003年に東京、大阪、名古屋でOFDMによる地上波デジタル放送を始めるのを皮切りに、2006年までに全

国展開することが計画されている^{‡2}。

こうした放送での実用化の動向が、無線LANの分野でOFDMが採用されるきっかけの一つになった。国内でOFDMを使った無線LANの仕様策定などを進めているマルチメディア移動アクセス(MMAC) 推進協議会に参加するKDDI研究所 取締役の濱井龍明氏は「地上波放送で採用されたことでOFDM用のLSI化が一気に進むと直感した。安価な受信機が可能になるとと考え、取り組みを具体化させた」と言う。

1個の搬送波では限界

OFDMが一気に通信の主役に躍り出てきたのは、時代の要請でもある(図3)。いわゆるブロードバンドやユビキタス・ネットワークと呼ばれる通信を実現しようとするとき、従来の手法では避けられないからだ。

OFDMが登場するまでは、デジタル通信では専ら单一搬送波による伝送が主流を占めていた。ところが、单一搬送波による伝送技術は大きな問題を抱えている。ビルや山などで反射した電波が引き起こすマルチパス干渉である。

この干渉があると、受信側でとらえる波形が大きく乱れる。その乱れは、受信機で等化器を使って修正する必要がある。送信側も受信側も固定が前提なら比較的対処は容易だが、携帯機器な

[†] ADSL (asymmetric digital subscriber line) = 電話線を使って、既存の電話サービスと、高速のデータ通信を同時に提供できる通信方式。電話局から家庭に向かう下り方向は1.5Mビット/秒である(または8Mビット/秒)と高速だが、逆の上り方向は512kビット/秒と低速。上りと下りの通信速度が非対称になる。

^{‡2} このデモンストレーションは、OFDMの派生技術の1つである「Flash-OFDM」の開発を進める米Flarion Technologies Inc.と共同で実施したもの。

[†] CAP (Carrierless Amplitude/Phase) = 振幅変調と位相変調を組み合わせた変調方式。上りと下りに搬送波を必ずつ使う。DMTと比較すると、帰還波の放

が少ない分、LSIなどの部品コストが安くなるという利点があり、初期のADSLではよく利用されていた。しかし、半導体の微細化が進んだことでDMTの表現に必要なFTT中階層1チップに集積できるようになり、現在は主役を譲っている。

^{‡3} この国内の地上波デジタル・テレビ放送の実用化計画は今、大いに揺らいでいる。デジタル放送を始める前に必要となる、いわゆるアナ-アナ変換に必要な費用が、当初見積もりの約900億円ではなく2000億円程度も掛かることが2001年11月に明らかになつたためである。この費用をどう捻出するか、まだ見通しはたっていない。アナ-アナ変換とは、現行のアナログ地上波放送の周波数を変更することをいう。地上波

デジタル放送に使う周波数帯域が足りないため、アナログ放送の周波数をずらしたり、放送送信所を廃止してケーブルテレビを駆除するなどして、デジタル放送用の周波数をやりくりする。2000億円は、周波数変更に伴う放送設備に掛かる費用や、周波数変更に伴つて必要となるユーザー宅にあるテレビ・チューナーの設定変更、アンテナの回収に掛かる費用、ケーブルテレビの設置費用などの合計である。

^{‡4} Rake受信は、反射などによって受信時に位相差、時間差がついた信号成分を別々に取り出し、位相をそろえて合成する受信方法である。これは、スペクトラム拡散信号を使って、送信信号が拡散されている場合に利用できる。受信機は、タイミングをずらして逆伝

どで使う場合は桁違いに難しくなる。時々刻々と変化する反射状況にリアルタイムに対応する適応型等化器が必要となるからだ。適応型等化器は、データ伝送速度が高まるにつれ、要求される計算量が指数関数的に膨れ上がる。このため、LSI化が難しくなった(pp. 108-109の「OFDM時代はずっと続くのか」参照)。

そこでこの問題を解決するために登場してきたのが、今花盛りのスペクトラム拡散である。「Rake受信」という手法を使って、この問題の解決を図った^[3]。同手法は、直接波だけでなく遅延して到着した波も拡散符号を使って分離し、それらを合算するものである。これによって、マルチパス干渉の影響を抑え、さらに高速化に伴って1シンボル当たりの受信電力が小さくなるのを遅延波の足し込みによって補うこともできる。2001年に相次いでサービスが始まった第3世代携帯電話や、自動車などの高速移動体をも対象にした衛星ラジオ放送などで利用されている。

しかし、このスペクトラム拡散も、单一搬送波を前提にすると限界が見えてきた。Rake受信では、高速化に壁があるからだ。この問題については、例えばNTTドコモが指摘している^[4]。同社は、下り方向の通信について、100MHzの帯域幅を利用することを前提に、Rake

戻を実施することで所望波と遅延波のみを分離できる。なお、Rakeは、英語で照手を意味する。

注4) 国土交通省道路局のWWWサイトに掲載された内容(<http://www.mlit.go.jp/readl/TS/4-hml/>)によると、「2001年3月30日までのETC試行運用期間中には、誤認金が発生した事例があった」という。また、「車両による一時的な電波反射など、あらかじめ予想のつかない事象により、まれに通信エラーを起すことがある」としている。この内容は「日経ビジネス」の2001年10月22号に掲載された記事に対する反論で、本サービス開始以降は、誤認金は報告されていないと主張している。

受信を行ったときの受信品質をシミュレーションで求めた。その結果、高速化するに従って、異なるシンボルの信号を拾うなどの弊害が次第に目立つようになるという。

これが、单一搬送波からOFDMへと、NTTドコモが第4世代携帯電話に向けた開発の方向性について、大きく舵を切った最大の理由である。OFDMだと、個々の搬送波を見れば、低速なデータ伝送と変わらず、高速化による弊害を解消できる。同社は、OFDMにCDMA(符号分割多元接続)を組み合わせた新方式の装置を試作し、2002年夏から接続試験を行う計画だ。

使えなかつばかりに…

このようなOFDMの利点は、さまざまな事情で他の方式を使ったために大きなトラブルに見舞われた事例を見れば逆に浮き出てくる。

国内の高速道路で2001年3月に運用が始まったETC(自動料金収受システム)

がその一例である。国内のETCでは、実用化時期の関係からOFDMを使わず、非接触型ICカードで一般に使われている変調方式ASK(振幅偏移変調)を採用した。しかし、いざ実用化してみると、やはり思わぬところで電波が反射し、マルチパス干渉対策でおおわらわになってしまったという^[5]。無線技術が専門のある大学教授は「ASKは非接触ICカードなど反射がほとんど起こらない場合には優れた変調方式である。しかし、ETCのような用途で使うと、反射波による問題が大きいことは目に見えていた。OFDMが使えていれば、ほとんどのトラブルを避けられたのではないか」と指摘する。

放送では、米国の地上波デジタル・テレビ放送「DTV」が代表例である。OFDMではなく、8値VSB^[6]を使って1998年11月にサービスを開始した。しかし、ここでも大きな問題点が浮上した。室内アンテナによる受信や、携帯機器による受信が難しいのである。マル

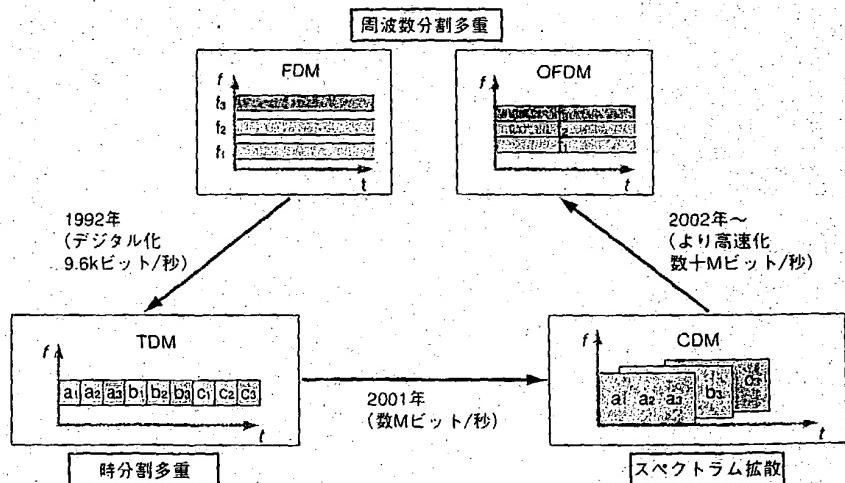


図3 变调方式の変遷
携帯機器を対象にした通信を例に、变调方式の変遷を示した。いわゆる第1世代のアナログ携帯電話時代はFDM(周波数分割多重)を使っていた。デジタル化した第2世代では、TDM(时分割多重)になった。その後、第3世代の「IMT-2000」では、高速化のためスペクトラム拡散(CDM)を採用した。さらに高速化に向か、携帯電話に割って入ってきたのが無線LANである。ここで、OFDMを採用することになった。つまり、形を変えて再びFDMに戻った。携帯電話も第4世代ではOFDMをベースに、CDMAを組み合わせた方式になる可能性が高まっている。

Cover Story

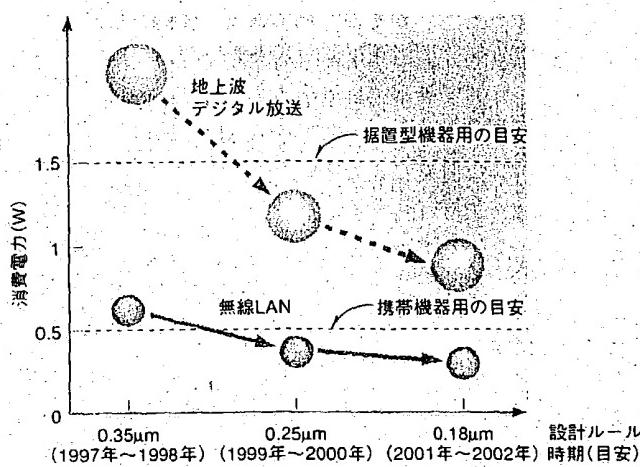


図4 ベースバンド処理LSIが現実に

現行品で消費電力が公表されているLSIを基に、LSIの設計ルールの変更によって、どのくらい消費電力が減るのかを取りまとめてみた結果である。5GHz帯を使う無線LAN向けでは、 $0.18\mu\text{m}$ ルールのCMOS技術を使って、250mW品が実現できている。2世代前の $0.35\mu\text{m}$ ルールでは、携帯機器向けに現実的なベースバンド処理LSIを実現するのは難しかったという。地上波デジタル放送向けでは、 $0.25\mu\text{m}$ ルールのCMOS技術を使って1Wを超える程度である。 $0.35\mu\text{m}$ ルールでは2W近くになってしまう。

チパス干渉が大きいと、うまく受信できないからだ。米国ではケーブルテレビ経由の視聴が多いという事情もあり、DTVの普及が思うように進んでいない。市場拡大の起爆剤として、手軽に利用できる携帯型受信機や室内アンテナによる利用を推進したくても、それができないジレンマに陥っている。

今だからこそOFDM

こうした状況がガラリと変わった。今はOFDMが当たり前のように使われ始めている。なぜ今OFDMなのか――。

その最大の理由は、LSIの微細化が進んだことで、ベースバンド信号を処理するLSIを1チップで簡単に実現できるようになってきたことである(図4)。こ

れが数年前と大きく異なる点である。

例えば、英国で地上波デジタル・テレビ放送が始まった1998年当時は、仕様を満たすようなLSIが実現できなかつた。標準方式に基づく仕様では、約8000本の搬送波を同時に処理することを求めていたが、この時点では約2000本を処理するLSIを実現するのがやつとだったという。OFDMでは、多数の搬送波をFFT回路(fast Fourier transform)によって一括処理するが、この回路をLSIに集積することがネックになっていたのである。これが、地上波デジタル放送でOFDMを使う利点の1つであるSFN(单一周波数ネットワーク)[†]を、英国が放棄した理由である。2003年に放送開始を目指す日本では、SFNを前提に作業が進んでいる。8000本の搬送波を処理するLSIを1チップで十分に実現できるようになったからである。

受信回路だけでなく送信回路も必要な無線LANでも、今まさにLSI化できるタイミングに入った。「1世代前のプロセスで何とか実現可能。2世代前だと実現できなかった」(松下電器産業半導体社開発本部半導体先行開発センター第二開発グループ第一開発チームリーダーの竹内真清氏)。ところが、 $0.18\mu\text{m}$ ルールのCMOS技術を使った現行のベースバンド処理LSIでは余裕が出てきた。同LSIに集積するA-D/D-A変

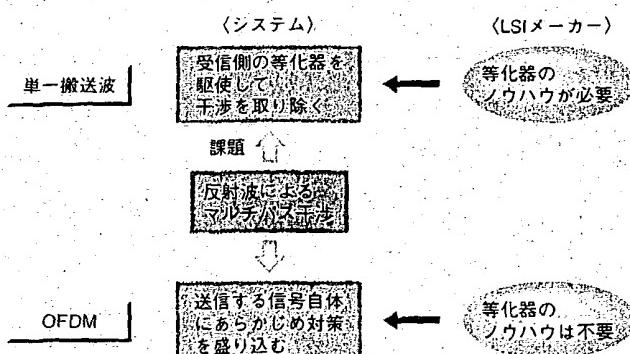


図5 等化器のノウハウは不要

無線による高速通信システムを実現しようとする場合、最大の課題が反射波によるマルチパス干渉である。単一搬送波による伝送の場合、受信側で対応策を取る必要があり、一般に復調LSIに等化器を搭載する。この等化器のノウハウで、受信品質に大きな差ができる一方、OFDMでは、送信する信号自体に対策が施されている。

*8VSB (vestigial sideband) = 米国の地上波デジタル放送が採用した、単一搬送波を使ったデジタル変調方式。振幅方向に2つの離散値を持つPAM (pulse amplitude modulation) の一種。米Zenith Electronics Corp.が開発した。米国がこの変調方式で地上波放送のデジタル化を推進すると表明した後、欧州でこれに対抗する形で急浮上してきたのがOFDMである。米国はそれでも、自圓で育てた技術を守りたかったのか、そのまま8VSBで実用化に突っ走った。

[†]SFN(单一周波数ネットワーク) = 複数の電波送信所が同じ周波数を使って放送すること。複数の送信所が同一の番組信号を充填した場合、片方は基準波と同じように扱える。受信者への信号到着時間のズレがあ

らかじめ想定した範囲内(ガード・インターパル内)であれば、OFDMの場合は正常に受信できる。放送の場合、送信所の数を少なくするため、距離を置いておのとの送信所を設置する。このため、ある程度のガード・インターパルを確保する必要がある。しかし、ガード・インターパルが長いほど搬送波の数が増え、LSIの回路規模が大きくなる。

注5) 受信信号の位相の回転は、信号発信者と受信者との間の距離が変わることで発生する。特にOFDMの場合、複数の搬送波に分けてシグナル(1回の変調で送信する1ビットあるいは複数ビットのデータ)を送るので、1シグナルの時間が長い。転送速度と移動速度が同じ場合、単一搬送波による伝送よりOFDMの方

が位相は大きく回転する。

[†]OQPSK (quadrature phase shift keying) = 直交振幅変調。振幅と位相に、送信したいシンボルをマッピングして送信する。1回の変調処理でマッピングするシンボルが4ビットの場合が16QAM、6ビットの場合が64QAM、8ビットの場合が256QAMである。

[‡]QAM (quadrature amplitude modulation) = 直交振幅変調。振幅と位相に、送信したいシンボルをマッピングして送信する。1回の変調処理でマッピングするシンボルが4ビットの場合が16QAM、6ビットの場合が64QAM、8ビットの場合が256QAMである。

注6) 国内の地上波デジタル放送の仕様では、各搬送波の変調方式としてDQPSK (differential QPSK)、



換器の量子化ビット数を「10ビットでも可能だが、より高品質な通信を実現するため12ビットとした」(同氏)という具合に、各社が工夫する余地すら生じている。

独特のノウハウは不要

このようにベースバンド処理LSIが現実になってきたことが、無線LANなどの標準仕様としてOFDMが統一と採用される大きな決め手になった。さらに、標準仕様を決めるに当たって、OFDMには強みがあった。それは、ベースバンド処理LSIの開発が、単一搬送波に対応するものに比べて容易であることだ。LSIの開発に当たって、開発メーカー独自のノウハウが必要となる等化回路が、OFDMでは不要になるからだ(図5)。

OFDMでは、無線通信の最大の問題点である反射波によるマルチパス干渉への対策が方式自体に盛り込まれている。ベースバンド処理LSIは、決められた処理をそのまま実行するだけでよい。もちろん、OFDMといえども、手の込んだ処理が必要なところもある。例えば通信の同期確立や、「伝送路上で発生する位相回転^(注7)」を補償するといった処理である。この辺りの実装では、LSIメーカーによって差がつく。しかし、それなりのものは、デジタル回路設計に強いLSIメーカーなら開発できるといわれて

QPSK、16値QAM、64値QAMが利用できる。また畳み込み符号の符号化率も1/2~7/8の中から選択できる。13個あるセグメントのうち、真ん中の1個を移動体通信向けに変調方式をDQPSK(符号化率1/2)とし、残る12個を固定受信向けに64値QAM(同7/8)とする、といった展開を想定した。

注7) こうした搬送波の部分利用の利点は、異なる用途に向けた通信であっても、共通の部品が使えることである。新たにLSIを開発する必要はない。同じベースバンド処理LSIであっても、一部の搬送波しか使わない場合は、FFT回路の動作速度を低くしたり、使わない伝送路補償回路をスリープさせるなどして一気に消費電力を抑えることができる。

いる。「OFDMを使ったベースバンド処理LSIについて、メーカー独自のノウハウに頼る部分が少ない。多数のLSIメーカーの参入が期待でき、競争で価格が下がる。これは無線通信の標準方式を選ぶ際の重要な判断材料になる」(無線LANの標準化作業に参加するNTTアクセスサービスシステム研究所 ワイヤレスアクセスマルチプロジェクト構内系アクセスグループリーダーの守倉正博氏)。

別の標準化関係者によると、実はIEEE802.11aの仕様策定に当たっては、単一搬送波による伝送も有力候補として提案され、OFDMを採用するかどうか大いにもめたという。ここで単一搬送波による伝送方式の最大の弱点が、適応型等化器をどうするかという問題だった。単一搬送波を推進するグループは「我々に任せてもらえば適応型等化器は実現できる」と説明した。しかし、それでは限られたメーカーしかLSI化できない。価格競争が起こりにくく、普及の足かせになる可能性がある。結局、このことがネックとなり、標準化の舞台で敗れ去ったという。

搬送波を目的別に振り分ける

LSI化が現実になったこれからは、

「OFDMありき」で、通信方式の詳細を詰めていく段階といえる。多くの搬送波を使いこなすことを前提に考えると、単一搬送波では実現が難しかったことがいとも簡単になる(図6)。例えば搬送波ごとに用途を振り分ける、あるいは搬送波ごとに変調方式(QPSK[†]にするか、QAM[†]にするかなど)を変えるなどの細工が容易にできるからだ。

搬送波ごとに用途を振り分けて使うという事例は、既に実用化に向けて動き出している^(注6)。例えば、日本の地上波デジタル放送においては、数千もの搬送波を13個のセグメントに分け、そのうちの1つあるいは3つを携帯型機器や自動車といった移動体向け放送に振り分ける方針である(図7)^(注7)。前述した、OFDMを使った無線LANの仕様をベースにPANの仕様を策定しようという考え方も、無線LANの搬送波のうち一部を、PANに割り当てようというもの。具体的な検討はこれから始まる。

直交条件を崩さなければ、各搬送波の変調方式を個別に設定できることを生かして「適応型変調」を実現できないかという試みも進んでいる⁽²⁾。適応型変調とは、各周波数帯別に雑音や干渉の状況をリアルタイムで監視し、通信

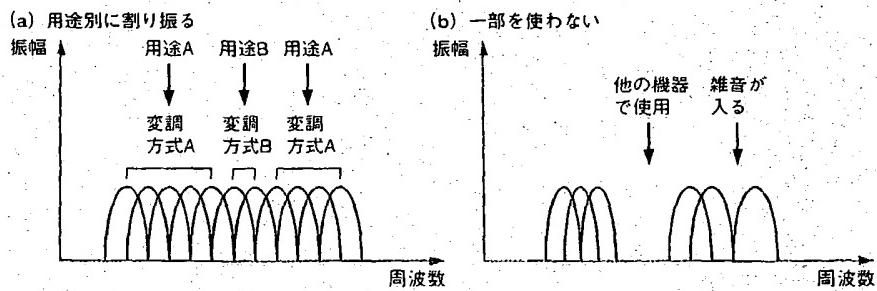


図6 多くの搬送波を自在に使いこなす
多数の搬送波を自在に使いこなすことで、単一搬送波による伝送では難しいことをOFDMは最も簡単に実現できる。例えば、搬送波ごとに異なる用途を割り振ることができる(a)。このとき用途別に、各搬送波の変調方式を変更することも可能である。高速化を要求する用途には64値QAM、速度は要求しないが安定した通信を要求する用途にはQPSKといった具合である。もう1つの例は、使う搬送波を周辺の状況に応じて変えられることである(b)。周囲から入る雑音で使えない、あるいは周囲の無線機器などに悪い影響を与える周波数は、たとえ帯域内でも使わない、といった応用が可能になる。

Cover Story



図7 部分受信でデジタル放送を携帯機器に届ける地上波デジタル・テレビ放送は、搬送波の一部を、携帯電話機などの携帯機器向けの放送に割り当てる。写真は、2001年11月に東京放送(TBS)が行なった地上波デジタル放送の公開デモンストレーション。携帯電話機を模した左側のディスプレイに表示された映像は、実際に部分受信を行って映し出したものである。

速度が常に最大限になるように変調方式を変えるものである。

これとは逆に、一部の搬送波の利用目的を絞ることで、その搬送波につい

ては最低限の伝送速度を確保すればよいという考え方も導入できる。例えば、日本の地上波デジタル・テレビ放送では64値QAMまで利用できることになっ

ているが、部分受信用の1つのセグメントだけQPSKで変調する。QPSKだと64値QAMに比べて、受信用のベースバンド処理LSIに搭載するA-D変換回路の量子化ビット数を減らすことが可能になる。64値QAMだと10ビット程度は必要になるが、QPSKだと6ビット程度で受信できる。部分受信用のLSIのチップ面積を小さくできる。

使えない周波数をスキップ

OFDMのもう1つの特徴は、各搬送波への情報の割り振りは任意であり、干渉や雑音の影響が大きいチャネルは使わないなどの柔軟な対応ができるこ

OFDM時代は ずっと続くのか

「高速な無線通信を実現する手段としては、ここ数年はOFDM以外まず考えられない。しかし、5年~10年先といった長いレンジで考えると、再び単一搬送波による伝送が主役になる可能性も否定できない」(NTTアクセスサービスシステム研究所 ワイヤレスアクセスプロジェクト構内系アクセスグループリーダーの守倉正博氏)。

守倉氏は、無線LANの分野でOFDMにいち早く目を付け、標準化の分野でも積極的に活動してきた1人である。その彼自身が、いわゆる第4世代の無線通信方式の研究開発で、OFDM系の技術にあまりにも傾斜している現状に警鐘を鳴らす。

OFDMはその難しさをアナログRF回路にしわ寄せしているというのがその理由である。例えば送信側のパワ

ー・アンプに極めて厳しい線形性が要求され、結果として消費電力が大きくなる(pp. 120-127の「パワー・アンプを制する者が5GHz帯無線LANを制す」参照)。ところが、パワー・アンプの性能はデジタル回路の伸びほど急激には改善されないとみる。

一方、単一搬送波を使う方式の課題は、デジタルのベースバンド回路である。単一搬送波で移動しながら高速通信を実現するには、反射波の影響によって乱れた波形を元に戻す適応型等化器を搭載することが前提になる。しかし、データ速度を上げていくと、この等化器の実現が急速に難しくなる。処理に必要な計算量が、伝送速度の高速化に対して、指數関数あるいはべき乗で増えるからである。しかしLSIの微細化が進み、高速な伝送速度に対応す

る等化器をチップ内に取り込めるようになれば、あとはデジタル回路の微細化に従って消費電力を小さくできる。

機器メーカーにとって、RF回路とベースバンド回路の合計の消費電力が小さい方がよい。今後、OFDMでRF回路の低消費電力化が思うように進まなければ、その間に単一搬送波のベースバンド回路の消費電力がグングン小さくなる可能性もある。まだまだ勝負の行方は分からぬといふ。

この警鐘は、守倉氏自身の経験に基づく。彼がOFDMの研究を始めた当初は単一搬送波による通信技術が主役の時代で、周囲の理解を得るのに大変苦労したという。それでも、FFT処理回路が1チップLSI上で簡単に実現する日が来る事を想定して開発を続け、やっと日の目を見る時代が来たと振り返る。将来の通信方式を考えるとき、実用化時期にどのような技術や部品が使えるかを想定しておかないと、判断

ある(図6(b))。

この特徴をフルに生かそうというのが、電力線モジュールである。電力線通信では、電力線の分岐点などで発生する反射波が悩みである。これが干渉を起こし、特定の周波数帯での通信を阻害するからだ。多くの搬送波で周波数を分割してデータ伝送するOFDMなら、この電力線ならではの難点をOFDMが解決してくれる。雑音が激しい周波数帯や、他の機器への干渉が心配な周波数帯など、特定の周波数が使えなくとも、搬送波を別の周波数に割り当てれば問題ない。例えば「まだ検討段階だが、アマチュア無線などに対する影響を

抑えることもできる」(2002年2月に最大45Mビット/秒の電力線モジュールを発表した住友電気工業)という。

住友電気工業の電力線モジュールは、上り回線に3.8MHz~6.4MHz(帯域幅は約3MHz)、下り回線に8MHz~12MHz(帯域幅は約4MHz)を割り当てる。しかし、10MHz帯など、アマチュア無線とぶつかる周波数がある。こうした周波数帯の搬送波を使わない対策を検討中である。

こうした利点は、ADSLをより高速にするVDSLでも生きそうだ。VDSLでも、ADSLのときと同様に標準仕様の座をめぐって、CAPと事実上のOFDM

であるDMTが競い合っている。しかし、「電話線は、周波数が高くなるほど雑音が大きい。雑音に状況に応じて周波数ごとに任意の変調方式を割り当てる。もし使えないほどひどい雑音があれば、使わなければよい。こうした使い方ができるDMTの方がCAPより有利だろう」(DMT方式による最大51Mビット/秒のVDSLモジュールを開発したNEC)と指摘する。

参考文献

- 1) 宇野ほか、「プロードバンドパケット無線アクセスの検討」、「信号技術」、電子情報通信学会、2000年10月号、pp. 59~66.
- 2) 宇野ほか、「マルチバス環境における直交周波数分割多点接続方式(OFDMA)のスループット特性に関する基礎的検討」、同上、2001年6月号、pp. 17~24.

を誤ってしまう可能性があるとの指摘だ。

プロードバンド向け等化器登場

実は、100Mビット/秒といった高速伝送でもLSI化を可能にすることを意識した新しい等化器の実現手法が登場している。その代表例が、NTTドコモ無線ネットワーク開発部 主幹研究員の松本正氏が提案するターボ等化器である¹⁾。これは、誤り訂正の分野で利用され始めた「ターボ符号」の概念を、等化器に応用したものである。

この等化器の特徴は、CDMA(符号分割多元接続)方式の携帯電話に向けて開発された等化器「SC-MMSE(Soft Canceller Followed by minimum mean-square error Filter)」と同等の能力を持ちながら、必要となる計算量を劇的に減らしたこと(図A-1)。SC-MMSEの処理に必要な計算量は L^2 (L は等化器のカバー範囲)のオーダだが、

ターボ等化器なら、これを L^2 のオーダまで下げられるという。

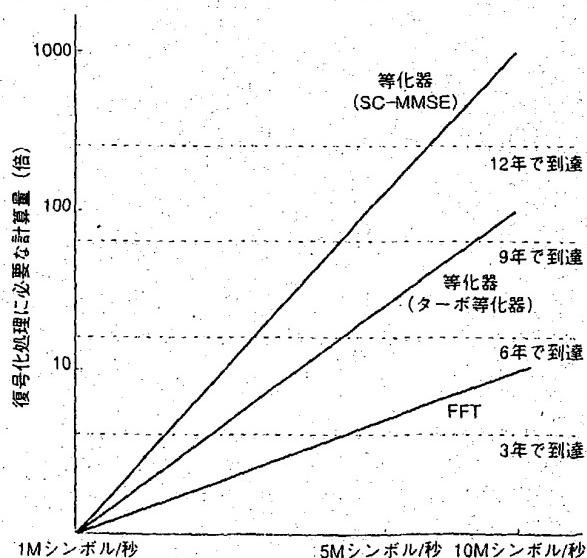
ムーアの法則によると、1.5年~2年で回路規模は2倍になる。仮に1.5年と仮定すると、100倍というのは約10年である(図A-1)。2010年の実用化を想定するいわゆる4G(第4世代携帯電

話)に向けて、単一搬送波と等化器の組み合わせた手法が息を吹き返す可能性があることを示す取り組みだ。

参考文献

- A-1) Oomori, H. et al., "A Matched Filter Approximation for SC/MMSE Turbo Equalizers," IEEE Communication Letters, Vol. 5, No. 7, pp. 310~312, July 2001.

図A-1 適応型等化器に必要な計算量
等化器とFFTについて、必要なとなる計算量を示した。この図では、1Mシンボル/秒の復号化に必要な計算量を1として正規化してある。等化器の場合、計算量はそのカバー範囲(L)で決まる。例えば伝送速度を1Mシンボル/秒、反射波の遅延時間が最大2μsと想定すると、 L は(1Mシンボル/秒)÷2μsでカバー範囲は2シンボルになる。従来のSC-MMSEでは、 L^2 で処理量は増加するが、ターボ等化器だと L で済む。つまり、10年経過すると、シンボル処理速度を1チップで10倍程度に高められる。FFTの処理量は、シンボル長を一定と仮定して求めた。横軸は「ムーアの法則」に基づいて、高速化による計算量の増加をLSIでカバーするのにかかる時間を示したもの。「1.5年で2倍の集積化が進む」と仮定した。



Cover Story

変調方式OFDMを理解する 「分けて寄せる」がポイント

変調方式OFDM (orthogonal frequency division multiplex) の特徴は大きく2つある。1つは、中心周波数が異なる多数の搬送波を使うことである。つまり、送信するデータを細かく分割し、幾つもの搬送波に乗せて伝送する。2つめの特徴は、隣り合う搬送波の帯域が重なり合うほど近接させても干渉することがないように、互いに「直交」させて送信することである。

送信するデータを分割するのは、1つの搬送波当たりのシンボル伝送速度を抑えられるからだ。ここでいうシンボルとは、1回の変調で送信する1ビットあるいは複数ビットのデータである。例えば、10個の搬送波に分割すれば、1波当たりのシンボル伝送速度を1/10にできる。それだけ余裕ができ、本来の信号より遅れて到着する反射波によるマルチパス干渉などに強くなる。

とはいっても、いたずらに分割数を増やして横に並べただけでは、周波数の利用効率が著しく低下する。占有する帯域幅がどんどん広がってしまうためだ。隣り合う搬送波の干渉を防ぐために用意する空きのスペースも無駄になる。こうした問題を一気に解消するワザが「直交」である。直交とは、例えばcos波とsin波の関係を指す。cos波がピークになるとsin波はゼロになる。逆

もまた真である。周波数の領域で、搬送波同士が互いに直交するように中心周波数を調整すれば、搬送波が一部重複する形で密に寄せても干渉しない。必要な周波数帯域幅が一気に狭まる。

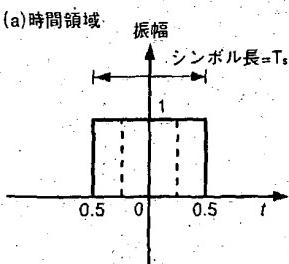
搬送波にデータを乗せる

ここではOFDMの全体像をつかむために、まず個々の搬送波を使って、どうシンボルを伝送するのかを見たい。個々の搬送波 $a(t)$ は、一般に次の式で示される。

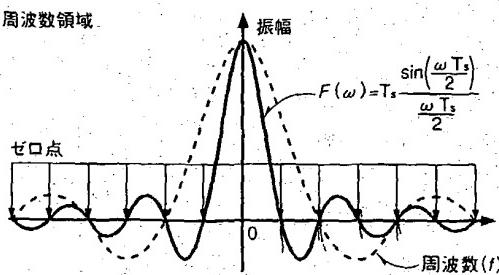
$$a(t) = A \cos(\omega t + \theta) \quad (1)$$

ここで、振幅 A や位相 θ にシンボルを割り当てて送信する。送信するシンボルに応じて A を変化させるのがASK (振幅偏移変調)、 θ をずらすのがPSK (位相偏移変調) である。 A と θ の両方に情報を割り当てるのがQAM (直交振幅変調) である。例えばQPSK (4相位偏移変調) では、位相 θ に $(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1)$ という4種類のシンボルを割り当てる。これらを、それぞれ $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ といった具合に、 $\pi/4$ の位相間隔で配置 (マッピング) する。最後にこのマッピングに応じて変調波の位相を変えて送信する。

こうした処理は、単一搬送波によるデジタル変調と同じである。



(a) 時間領域



図B-1 矩形波を周波数成分で見る

シンボル長 T_s の矩形波 (a) を、フーリエ変換して周波数領域で見たのが (b) である。一定間隔でゼロ点が現れる T_s が半分になると、周波数領域で見たときの波の形は、灰色で示した点線のように横方向に2倍に広がる。なお周波数 (f) は、一般に $\omega/2\pi$ で換算できる。

複数の搬送波を直交に並べる

この搬送波をOFDMでは互いに干渉しないように密に並べる。これを実現するのが、直交という考え方である。

各搬送波同士が干渉しない仕組みは、周波数領域で搬送波の挙動を見ると分かりやすい。ここでは簡単のために、まず時間領域で矩形波となる信号が、周波数領域でどう表されるかを見る。

図B-1は、シンボル長 (T_s) が1秒の矩形波をフーリエ変換して、周波数領域で信号成分を見たものである。周波数がゼロの位置に振幅のピークが来る左右対称な波形となる。周波数領域での波形は次の式で表せる。

$$F(\omega) = T_s \frac{\sin(\omega T_s / 2)}{(\omega T_s / 2)} \quad (2)$$

ここで、ポイントは2つある。1つは、振幅が0になる周波数 (ゼロ点) では、時間を問わず常に0となることである。その位置は、 \sin 関数の中にある $\omega T_s / 2$ が $\pi, 2\pi, \dots$ となるところで、等間隔に並ぶ。つまり、このゼロ点になる周波数に別の搬送波を持ってても、元の信号と干渉しない。これを直交という。

もう1つのポイントは、 T_s の値が大きくなるのに反比例して、波の間隔が狭くなることである。例えば、 T_s を2倍にしてゆっくりシンボルを伝送すると、ゼロ点の間隔は1/2になる。逆に高速に伝送しようと T_s を単に半分に短くしてもゼロ点の間隔が2倍に広がるので (図B-1の点線)、搬送波の間隔が広がってしまうという性質がある。

実際には矩形波ではなく、QPSKやQAM

*フーリエ変換 (Fourier transform) = 時間軸の波形から、空間軸の波形へ変換する手法。逆に空間軸から時間軸へ変換するのが逆フーリエ変換である。フーリエ変換と逆フーリエ変換の変換式は次の通り。

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j\omega t} df$$

$j\omega$ を入れ替えただけで、式の形はほぼ同じである。フーリエ変換では f は任意の値を取るが、有限のサンプル値から計算する手法がDFT (離散的フーリエ変換: discrete Fourier transform)。これを高速に計算する手法がFFT (高速フーリエ変換: fast Fourier transform) である。

などで変調した搬送波を使う。シンボル長 T_s の搬送波を周波数領域の信号成分で表したもののが図B-2である。波形は矩形波のときと同じだが、その位置だけが横にずれる。例えば搬送波の周波数が 10Hz だったとするとき、 10Hz の位置にピークが来る。ゼロ点の間隔は変わらない。

ここまで説明をまとめると次のようになる。 T_s が一定の場合には、搬送波の周波数にかかわらず、ゼロ点が一定間隔で現れる。このことを利用すれば、複数の搬送波を直交する形で配置できる。

マルチバス干渉に強くなる

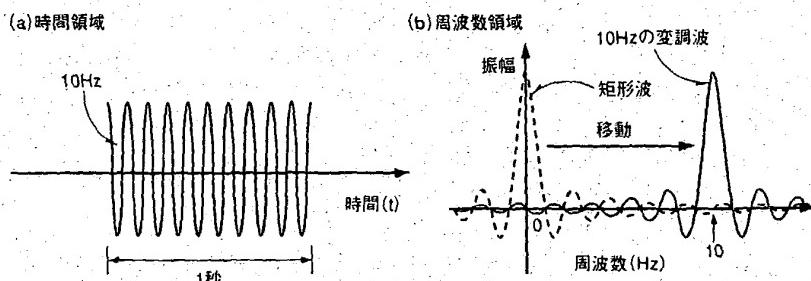
このような方法で伝送すると、反射波によるマルチバス干渉に強くなる。その理由を次に述べたい。

図B-3は、単一搬送波による伝送とOFDMによる伝送のそれぞれについて、反射波による影響を示したものである。左は単一搬送波による送信、右はOFDMによる送信である。

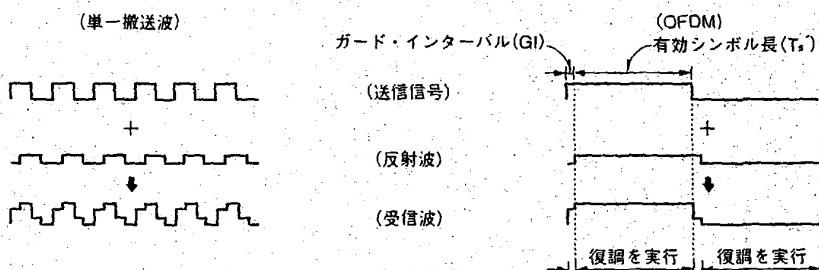
OFDMでは、6つの搬送波を利用する仮定した。つまり、シンボル長は単一搬送波に比べて6倍になる。一方、周辺環境が同じならば、反射波が受信地点に到着する遅延時間は同じである。送信波と反射波を合成した波形を見ると、単一搬送波では波形が大きく崩れてしまうのに対し、OFDMではそれほど崩れない。

OFDMでは、このマルチバス干渉による妨害をさらに抑える裏技が使える。ガード・インターバル (GI) である^[EB-1]。これを導入すると図B-3のように、反射波によって波形が歪む部分は無視し、平坦な所だけで復調できる。実際に復調を実行する区間が有効シンボル長 (T'_s) で、実行しない区間がガード・インターバルである。

注B-1) ガード・インターバルは、送信するシンボルに対して、時間領域で外挿する。内挿すると、受信側で復調するときに有効シンボル長と、搬送波の周波数がずれて、直交性を維持できないためである。



図B-2 変調波を周波数領域で見る
シンボル長 T_s の変調波 (a) の信号成分を周波数領域で見たのが (b) である。その波形は矩形波のときと同じだが、変調した周波数の分だけ横にずれる。



図B-3 反射波による干渉に強い
シンボル長が短い单一搬送波では、反射波の影響で、受信波の波形はガタガタになる。OFDMでは、シンボル長が長く、反射波の到着時間は同じでも、受信波の波形はそれほど歪まない。さらに、反射波による影響が想定される区間は、ガード・インターバルとする。受信側ではガード・インターバルの区間を無視し、きれいな波形（有効シンボル）の部分だけで復調を実行する。

複数の搬送波を並べる

このような変調方式OFDMを、実際にどのように実現するのかを示したのが次ページの図B-4である。

まず送信するシンボルを、いわゆる直列並列変換によって搬送波の数だけ分割する。この後、分割したデータ列をおののおのを、互いに直交する搬送波で変調する。最後にガード・インターバルを挿入し、それらを合成して送信する。復調時には、逆の処理を行えばよい。

ここで重要なのは、各搬送波の変調処理に逆FFT（高速フーリエ変換）を使うことである。互いに直交する搬送波で変調する際、一般には各搬送波に対応するそれぞれ周波数が異なるシンセサイザを用意しなければならない。ところが実用化されたシステムでは、数十から数千の搬送波を使っている。これだけの数の周波数シンセサイザ

を用意するのはコストが膨大になり、非現実的である。そこで逆FFTが登場する。逆FFTで高速演算処理すると、多数の直交搬送波の変調処理を一気に実行できる。考え方は以下の通り。送信するシンボルについて、送信する搬送波ごとに位相と振幅の大きさをマッピング（変調）する。それを逆FFTすることで、周波数領域のデータを時間領域の信号に一括変換する。

復調処理は、変調処理の逆方向なのでFFTを使う。まず、搬送波ごとにガード・インターバルを除去した後、FFTによって位相と振幅のデータを得て、受信したシンボルのデータを判定する。

OFDMのパラメーターを決める

次にOFDMを利用するととき、各種パラメーターをどう決めるのかを見る。

例えば、10Mシンボル/秒の伝送速度で、

Cover Story

50m程度の距離の通信を行う場合を想定する。ここでは、反射波が受信地点に到達するまでにたどる距離を、最大350mと仮定しよう。

この条件では、まずガード・インターバルの長さが決まる。送信波と反射波の到達距離差は350m-50mで最大300mである。これを時間に直したのがガード・インターバルで 10^{-6} 秒(1μs)となる。次に有効シンボル長を決める。ガード・インターバルに対して有効シンボル長(T_s')が短いと、無駄が多くなり実効データ伝送速度が上がらない。逆に T_s' を長くすると、シンボル長(T_s)も長くなり、結果的に搬送波の数が増えてしまう。FFTの演算量は、搬送波数に比例して増えるので、受信側のハードウエア規模が大きくなるという弊害が生じる。ここでは一例として、 T_s' はGIの4倍となる4μsとする。

こうしてシンボル長が決まると、必要な搬送波の数と、搬送波の間隔(Δf)が決まる。シンボル長($T_s = T_s' + GI$)が5μsなので、1つの搬送波の伝送速度は、200kシンボル/秒である。10Mシンボル/秒を伝送するには、 $10M \div 200k$ で50個の搬送波が必要になる。搬送波の間隔は、 $1/T_s$ となるので、 $1/5\mu s$ つまり250kHzである。従つ

て50個の搬送波を送信するために必要な全帯域幅は $50 \times 250\text{kHz}$ で12.5MHzとなる。

通信の分野で有名な「シャノンの定理」によると、理想的な通信路では10Mシンボルは10MHzの帯域幅で送信できる^{注B-2)}。OFDMでは、ガード・インターバルがないと仮定すると10Mビット/秒を送信できる。実際にには、ガード・インターバルを設けた分だけ、シャノンの定理による理想よりも伝送速度は下がる。この例では、シンボル長に占める有効シンボルの長さが4/5なので、帯域幅で見た伝送効率は4/5だけ低下した。

OFDMの実際

先の例では、無線LANのような使い方を想定して、遅延時間を短く設定した。例えば、放送のように広域の伝送を想定すると、反射波の遅延時間がもっと長くなる。所望の信号に対して、到達距離差が30kmの反射波まで対策が必要な場合を考えてみる。するとガード・インターバルは先の例の100倍の100μsにする必要がある。有効シンボル長も100倍にしないと伝送効率が一気に低下するので、結果としてはシンボル長が100倍、搬送波の数も100倍の5000本となる。

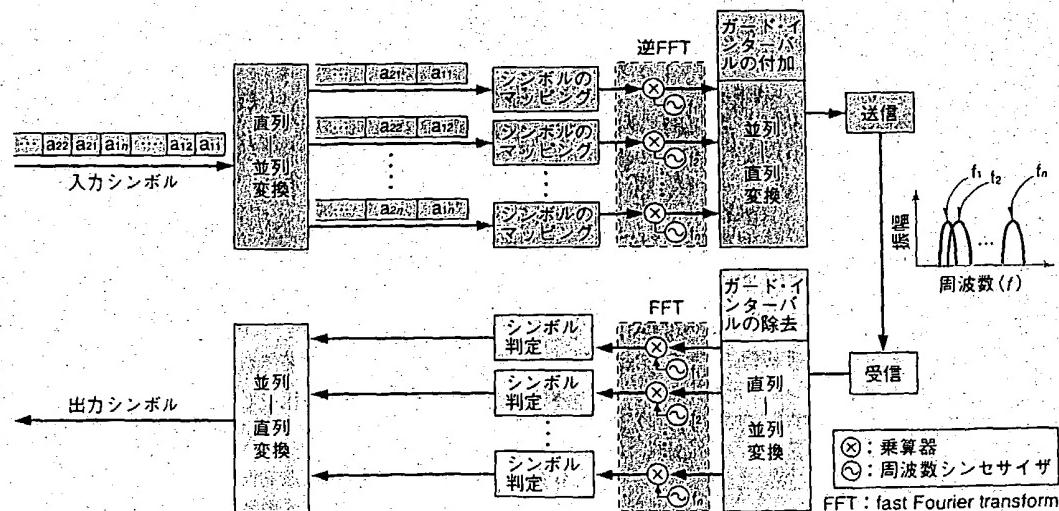
実際にOFDMを利用する場合は、こうしたパラメーターはさらに最適化する必要がある。まず、占有周波数帯域幅が12.5MHzしかない、隣接チャネルが干渉してしまう。このため、占有帯域の上下の周波数に空きを用意しなければならない。実際に送信できるシンボル数も減る。パイロット信号や誤り訂正用の符号と一緒に多重して送信する必要があるからだ。搬送波の数は、 2^n の数値になるように選ぶ。FFT変換や逆FFTを実行する際、選択できるポイント数が 2^n だからである。

ただ、実際のOFDMを使った通信システムの仕様を見ると、FFTのポイント数より搬送波の数が少ないケースが多い。これは、あえて一部の搬送波を使用しないことがあるからだ。例えば、移動体で受信することを想定して、ドップラー効果による周波数の偏移に備えるためである。あらかじめ使用しない搬送波の周波数を決めておくと、受信側で信号が送られていない周波数を検知して、ドップラー効果による偏移に対して誤った周波数同期をしていないかチェックできる。

注B-2) 理想的な通信路とは、雑音がなく、かつ周波数領域で見たときに矩形波となる信号を使って通信した場合である。

図B-4 OFDMの送信/受信機器の回路ブロックの例

FFTと逆FFTは、回路構成は同じである。そのため、送信側をFFT、受信側を逆FFTとしたり、ともにFFTと表記する例もある。ここでは、最も一般的な事例に従った。なお、シンボルの位相や振幅をマッピングすることを変調と表記する例が多い。



第2部

いざ第4世代へ ケータイに向け歩を速める

地上波デジタル放送と無線LANを制したOFDMは次の矛先を移動体通信に向けた。

携帯電話並みに広い範囲で利用でき、かつ双方向の通信方式にOFDMを適用し、下り方向で100Mビット/秒の達成を目指す。

そのためOFDMはさらなる進化を遂げる。

第3世代の携帯電話を支えるCDMA技術を取り込みユビキタス・ネットを支える基盤技術に飛躍する。

無線LANや地上波デジタル放送を核として急速に広がるOFDM変調技術。その流れはとどまることを知らない。中でも今、研究開発が活発に進んでいるのは、OFDMを携帯電話のような移動

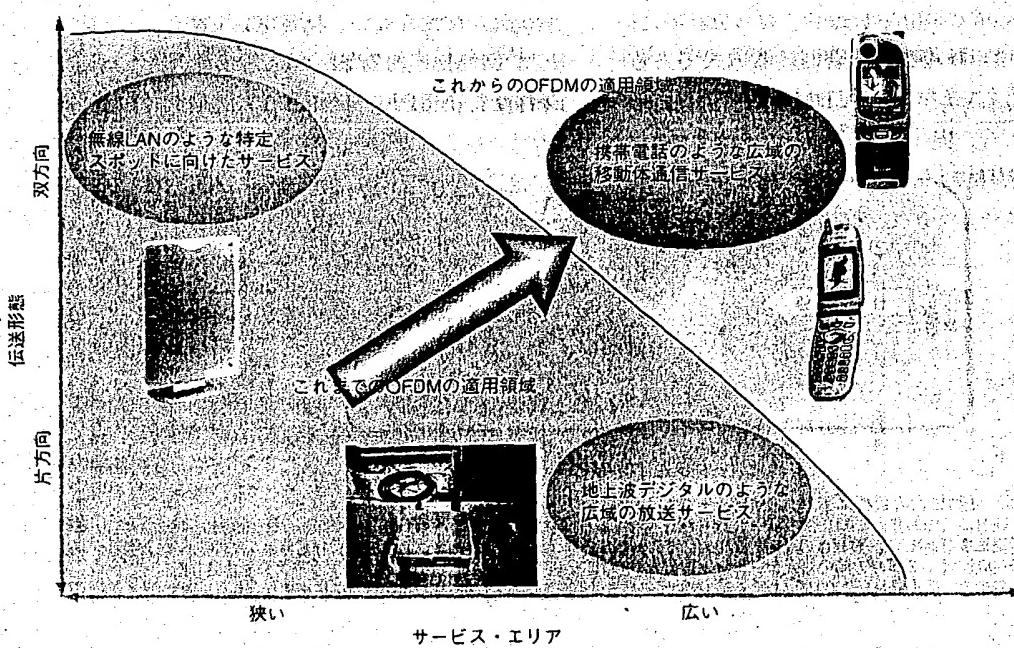
体通信の世界に適用するものである(図1)。

OFDMはマルチパス干渉に強く、実効的な周波数利用効率が高い。この特性は、無線LANのような小エリアで威

力を発揮するのはもちろん、携帯電話などの移動体通信でも強く求められている。

そこに注目した国内外の無線通信研究者が、OFDMを基にした新しい伝送

図1 次は移動体通信へ
OFDMを携帯電話のような移動体通信サービスに適用する動きが活発になっている。OFDMはこれまで、無線LANのような特定スポットや、デジタル放送のような広域の片方向サービスに利用されてきた。それを携帯電話のような広域かつ双方向で、さらに移動環境にも対応させる。このため、OFDMとCDMA (code division multiple access) を組み合わせて周波数利用効率を高めると、移動環境での利用を想定した技術の開発が進んでいる。



Cover Story

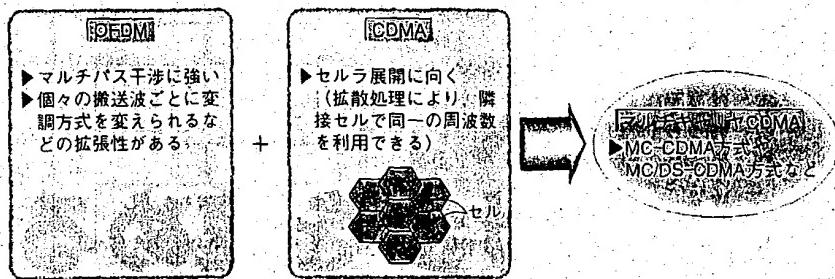


図2 「いいとこ取り」を狙う
OFDMAとCDMA技術を組み合わせるマルチキャリヤCDMAでは、隣接セルで同一周波数を使うことが可能になる。携帯電話サービスなどで利用する際に実効的な周波数利用効率を向上できる。なおかつOFDMAが元来備えているマルチバス干渉への耐性はそのまま保持する。こうした性質からマルチキャリヤCDMAは、第4世代の移動体通信を担う技術として注目を集めている。

方式の開発に挑んでいる。その多くは、OFDMAを携帯電話網のセル構成で利用できるようにするために、多元接続（マルチプルアクセス）技術を組み合わせる提案である。OFDMAは今の無線通信の本丸ともいえる携帯電話の世界の侵食を、虎視眈々と狙う（pp. 118-119の「OFDMAをBWAに、米国での取り組みが盛ん」参照）。

マルチキャリヤ化への期待

OFDMAを進化させる手法で最も注目されているのは、CDMA（code division multiple access：符号分割多元接続）技術を組み合わせる方式である。「マルチキャリヤCDMA」技術と呼ぶ。

CDMA技術は、既に第3世代移動体通信システム「IMT-2000」で利用されている。ユーザーごとに異なる拡散コードを使うことで、同一周波数を複数ユーザーで共用できる。これにより携帯電話網の1サービス領域（セル）において、収容するユーザー数を増やす。隣接するセルで同一周波数を使える利点もある。

マルチキャリヤCDMAは、この拡散コードの概念をOFDMAに加えることで、両者の「いいとこ取り」をする方式だ（図2）。「素のOFDMAでは同一周波数を隣接セルで使えない。携帯電話で使うには、CDMAを組み合わせることが必須条件だ」（NTTドコモ ワイヤレス研究所 無線アクセス研究室の担当者）。

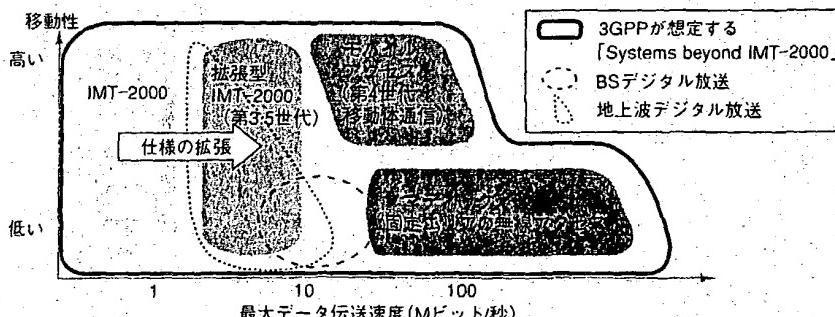


図3 第4世代の目標は下り100Mビット/秒
ITU-Rは、1999年末にIMT-2000の次世代仕様を検討するグループ「WP8F」を設けた。同グループは、最大データ伝送速度が2Mビット/秒程度の「IMT-2000」、その拡張版で最大データ伝送速度が20Mビット/秒前後の「拡張型IMT-2000」、そして下り方向の最大データ伝送速度が100Mビット/秒前後と高速な「モバイルアクセス」を定義した。ここで、拡張型IMT-2000がいわゆる第3世代で、モバイルアクセスがいわゆる第4世代に相当する。さらに固定スポットでの通信に規定しながらも最大データ伝送速度を数百Mビット/秒まで高める「ノマディック/固定エリアの無線アクセス」も定義している。（図：電波産業会の資料を基に本誌が作成）

所 無線アクセス研究室の担当者）。既にNTTドコモをはじめとして、大阪大学や松下通信工業、三菱電機、日本テレコム、シャープ、通信総合研究所などが、マルチキャリヤCDMA技術の研究開発に着手している。

第4世代を狙う

ここにきて通信事業者や通信機器メーカーがマルチキャリヤCDMA技術の研究開発に必死で取り組んでいるのは、第4世代移動体通信方式の議論が、じわじわと具体化しつつあるためである。

IMT-2000の規格化を進めたITU-R（International Telecommunication Union-Radiocommunication Sector）の作業グループ「WP8F」は、1999年11月の会合でIMT-2000の後継方式「Systems beyond IMT-2000」の検討を開始した。同グループらは、下り方向の最大データ伝送速度を100Mビット/秒程度まで高めながらも、現行の携帯電話と同じような使い勝手で利用できる新仕様の策定を狙っている（図3）。WP8Fは、2002年6月までに、後継サービスの勧告案を固める意向だ。

国内でも同様の議論が始まっている。総務省の諮問機関である情報通信審議会は2001年6月、最大データ伝送速度が50Mビット/秒～100Mビット/秒の新しい無線アクセス方式が、2010年ころま

拡散コード＝スペクトラム拡散技術を利用するCDMAは、伝送するデータ列に、それと無関係な符号系列を掛け合わせて周波数軸上に拡散させ、情報の秘匿性や耐干渉性を高めている。その符号系列を拡散コードと呼ぶ。具体的には例えば疑似雑音（PN: pseudo-noise）符号やBarker符号が使われる。なお、拡散コードの伝送速度の単位を「チップ」と呼ぶ。例えばW-CDMA（利用帯域幅5MHzの場合）の拡散コードの伝送速度（チップ・レート）は、3.84Mチップ/秒である。

表1 高速な移動体通信に向けたOFDMの派生方式

方式	マルチキャリヤ方式			シングルキャリヤ方式（参考）
	MC/DS-CDMA	MC-CDMA ^{**}	flash-OFDM	DS-CDMA(SC/DS-CDMA)
手法	マルチキャリヤ方式の直接拡散による符号分割多元接続	マルチキャリヤ方式の符号分割多元接続	周波数ホッピング方式のスペクトラム拡散技術とOFDMの組み合わせ	直接拡散による 符号分割多元接続
実用化時期と用途 [†]	2010年ころの第4世代移動体通信	2010年ころの第4世代移動体通信	現行世代の移動体通信、ホットスポット	第3世代移動体通信（NTTドコモの「FOMA」など）
回線の種類 ^{**}	上り（端末から基地局へ）	下り（基地局から端末へ）	上りと下りの両方	上りと下りの両方
隣接セルにおける同一周波数の利用	○	○	○	○
マルチバス干渉への耐性	○	○	○	△
周波数帯域の有効利用度	△	○	○	△
最大データ伝送速度	100Mビット/秒	100Mビット/秒	3Mビット/秒	W-CDMAの場合、2Mビット/秒
占有帯域幅の例	—	NTTドコモが提案する OFCDMの場合は100MHz	1.25MHzおよび5MHz	W-CDMAの場合は5MHz
研究を進めるメーカーや団体	慶應義塾大学、日本テレコム、大阪大学、通信総合研究所など	NTTドコモ、大阪大学、東北大、東京理科大学、通信総合研究所など	米Flarion Technologies Inc. オランダPhilips Semiconductors社など	既に実用化

[†] 「OFDM-CDMA」や、「OFCDM」という呼び方もある^{**} 現時点で検討されているもの

でに必要になると答申している^{[注1]、[1]}。「移動体通信システムは、その仕様策定からサービス開始に至るまで10年かかる。つまり、第4世代の研究開発は今から始めなければならない」(NTTドコモ)。

第3世代移動体通信方式の標準化の際には、重要な特許の多くを海外メーカーに取得されたという苦い経験がある。そうした背景から、2010年と先の話ではありながらも、国内メーカーの研究のスピードが加速している状況だ。『米QUALCOMM, Inc.のような特許を取れど、研究者を鼓舞している』(ある国内メーカーの担当者)。そうした研究者の内で、最も注目を集めているのがマルチキャリヤCDMA技術なのである。

多数の提案が続出

マルチキャリヤCDMAには、幾つかの異なる技術提案があり、いまだ第4世代の本命方式が決まっているわけではない(表1)。ただし、多くの研究者から総じて注目を集めている方式が2つある。同一シンボルを複数のサブキャリヤで直交させて伝送する「MC-CDMA(multicarrier CDMA)」と、直接拡散方式のスペクトラム拡散処理を施したサブキャリヤを複数利用する「MC/DS-CDMA(multicarrier/direct spread CDMA)」である(図4)^[注2]。このうちMC-CDMAの方が大容量のデータ伝送に適しているという報告がなされており、それを基地局から端末への下り回線に使

い、MC/DS-CDMA技術は上り回線に利用する案が有力になりつつある^[2]。

MC-CDMAを上りと下りの両方に使いにくいのは、次のような理由からである。MC-CDMAではOFDMと同様、サブキャリヤを周波数軸上に直交させて伝送する必要がある。下り回線の場合、基地局の決めたタイミングで拡散処理や直交処理を行えるため、直交性を正しく確保した状態で伝送しやすい。

一方で上り回線の場合、個々の端末から基地局に対してバラバラに送信されるサブキャリヤを、それぞれ周波数軸上にそろえて直交させることは非常に難しい。直交性が維持できないため、サブキャリヤ間での干渉(いわゆるシンボル

注1) これを受けて総務省は、2002年中にも第4世代などの将来の移動体通信用の無線周波数帯に関する方針を策定する。2003年に開催が予定されている世界無線会議「WRC 2003」において、第4世代移動体通信の無線周波数について検討される予定だが、そこまでに日本案を固めておく狙いがある。実際に第4世代移動体通信の無線周波数が国際分配されるのは、2005年～2006年になる予定。

注2) NTTドコモは、MC-CDMAをOFCDM(Orthogonal Frequency and Code Division Multiplexing)と呼んでいる。今後は、OFCDMという呼称が一般的になる可能性もある。

Cover Story

間干渉)が増大する。このため、上り回線に関しては、データ伝送速度が劣るが、周波数軸上で各サブキャリヤの直交性を維持する必要がないMC/DS-CDMA技術を使うという提案だ^{(3), (3)}。

例えばNTTドコモは、MC-CDMA技術を基にして、CDMAの拡散率を可変にした方式「VSF-OFCDM (Variable Spreading Factor-Orthogonal Frequency and Code Division Multiplexing)」を、第4世代に向けた物理層の伝送方式として提案している(図5)⁽⁴⁾。同方式を下り方向のデータ伝送に利用し、上り回線にはMC/DS-CDMA技術を適用する⁽³⁾。

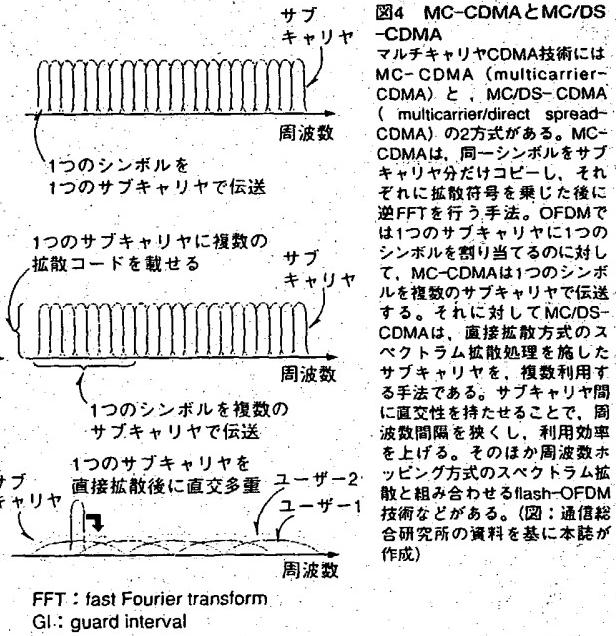
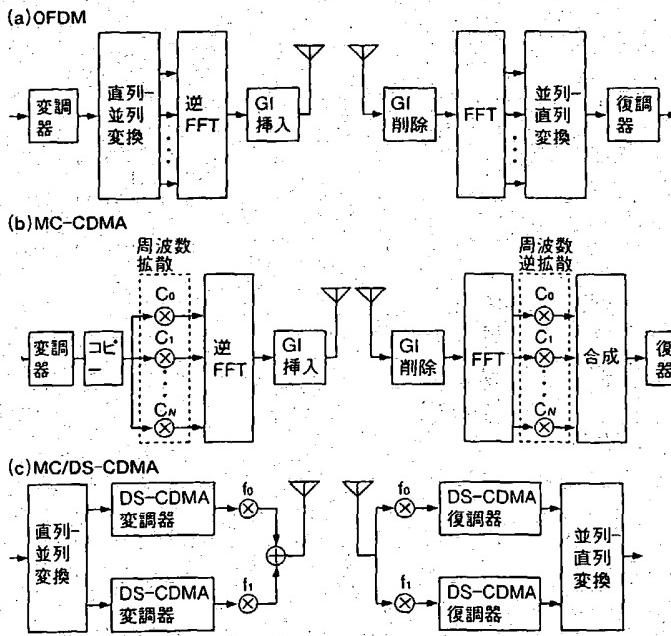
ホットスポットもセルラでも

VSF-OFCDMは、NTTドコモのシミュレーションでは下り方向の最大データ伝送速度が103.68Mビット/秒と高い。第4世代移動体通信の要求を満たしている。「VSF-OFCDMは、移動体通信環境において、ほかの方式に比べて最もシステムの大容量化を実現しやすい。特に下り回線には非常に適した方式と考えている」(NTTドコモ)。

拡散率が可変なので、ホットスポットのような固定エリアに向けたサービスから、携帯電話のような広域サービスまで対応できるのが特徴である。例えば

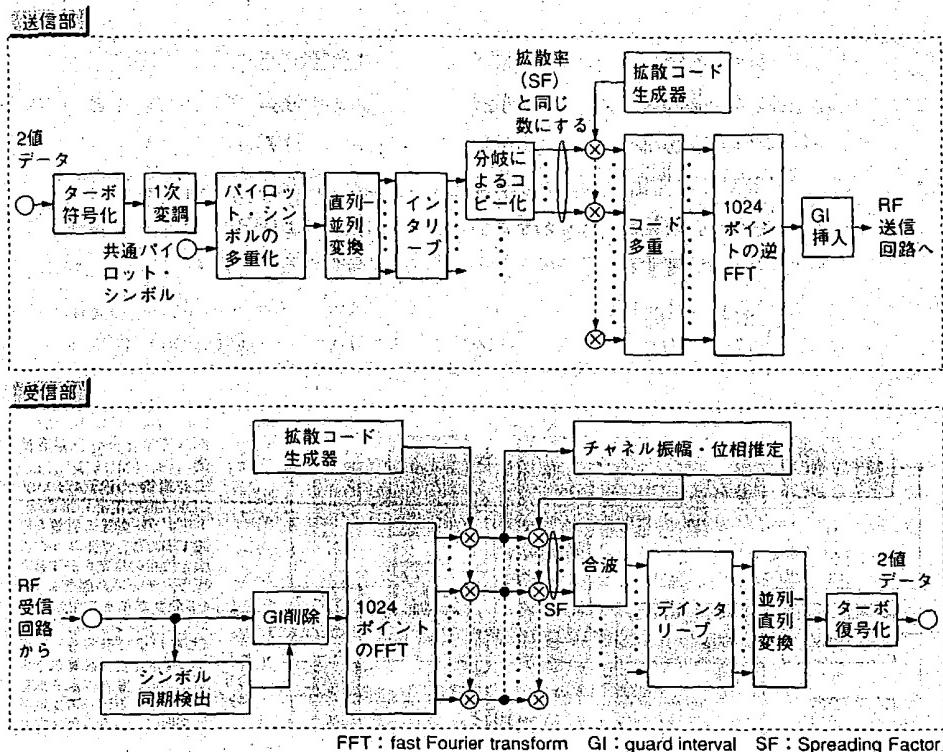
孤立セルのホットスポットの場合は、拡散率を1にすることで最大データ伝送速度を300Mビット/秒以上に高めたサービスを提供できる。広域サービスの場合は拡散率を16程度に増やし、15コード多重することで、最大100Mビット/秒程度のサービスをセルラ環境で提供できる。

第4世代の移動体通信サービスでは、携帯電話のような広域サービスと、無線LANのような特定エリアのサービスの両方を組み合わせる形になると見られている。VSF-OFCDMの場合は、それらのいずれにも1方式で対応できる点が強みだ。



注3) MC-CDMA技術を上り回線に利用しにくい理由はもう1つある。MC-CDMAの波形は多段のサブキャリヤの合成波となるため、そのピーク時の電力が非常に大きくなる。基地局の受信回路では、各端末がそれぞれ伝送してくる波形を重ね合わせたものを処理するため、端末の受信回路に比べて、高いピーク電力に対応する回路を構成する必要がある。

注4) 一方で、MC-CDMAを上り回線にも利用するという提案も少なくない。例えばワイ・アール・ビー移動通信基盤技術研究所は、バイロット・シンボルの使い方を工夫することで、MC-CDMAで上り回線を実現する技術を提案している。基地局でのマルチユーザー受信の際に、バイロット・シンボルを使って受信強度のMMSE(最小2乗平均誤差)を算出し、相間を取る手法である。これにより、基地局側で受信するサブキャリヤの直交性が多少崩れても、許容できるようになるという。このほか大阪大学など、TDD(time division duplexing)方式の研究開発を進める研究機関では、上り方向と下り方向で別の通信方式を使わずに済む手法の研究を進めている。



方式名	可変拡散率 (VSF) OFCDM
帯域幅	101.5MHz
サブキャリヤ数	768
サブキャリヤ間隔	131.836kHz
FFTのポイント数	1024
シンボル長	9.259μs
有効シンボル長	7.585μs
GI長	1.674μs
フレーム長	54シンボル(0.5ms)
1次変調方式	QPSK, 16値QAM, 64値QAM
ターボ符号の符号化率	1/3~5/6
拡散率 (SF)	1~256

図5 OFCDM送受信回路の構成
NTTドコモが提案しているOFCDM方式の送受信部の構成である。同社がシミュレーション実験を行うために作製した。拡散率は16で(16のサブキャリヤに1つのシンボルを載せる)、15コードを多重する。1024ポイントのFFTを用いる。1フレームは54のシンボルで構成する。その中には、適応変調を行うためのSIR (signal interference ratio) 測定およびセル探索に使うパイロット・チャネルを6つ含んでいる。例えば1次変調方式にQPSKを使ったときの最大データ伝送速度は103.68Mビット/秒である。

768本のサブキャリヤを利用

VSF-OFCDMでは、103.68Mビット/秒のデータ伝送速度を実現するため、101.5MHzの帯域幅を使う。この帯域幅の中に、5GHz帯無線LANの10倍以上となる768本のサブキャリヤを配してデータを伝送する。サブキャリヤ間隔は131.836kHzと、地上波デジタル放送に比較して広くした。間隔を広くすることで、移動体通信で大きな問題となるドップラー効果⁵⁾によるサブキャリヤの

周波数シフトの影響を軽減した⁶⁾。

シンボル長は9.259μsだが、そのうちガード・インターバル(GI: guard interval)は1.674μsを占める。遅延量が最大1μs程度のマルチパス干渉を吸収する狙いから、GIを長く取った。

NTTドコモは、2002年夏にVSF-OFCDMの基礎実験を開始することを明らかにしている⁵⁾。試作システムの開発はNECなどが受注した。この実験により、伝送パラメーターの詳細な値を固

めていく方針だ。

VSF-OFCDM方式をはじめとするMC-CDMA技術については、国内の機器メーカーの間でも期待が高まっている。例えば三菱電機はMC-CDMA技術を応用して、移動体通信で問題となるマルチパス干渉やドップラー効果への対策を施した技術提案を行っている(図6)。受信時に複数のパイロット・シンボルを使うことで、周波数や位相のずれを補正する。

5) ドップラー効果は発信者と受信者の距離の変化によって、発信側の周波数と受信側の周波数がずれて測定される現象。OFDMでは、周波数ずれによってシンボル間干渉が起こることになる。

6) LDPC (Low-Density Parity-Check Codes) と呼ぶ符号化方式を採用している。

注5) 例えば、サブキャリヤの周波数を5GHzに取った場合、最大移動速度を300km/hと仮定したときのドップラー効果による周波数シフトの最大値は1400Hzである。つまりサブキャリヤ周波数間隔との比率は $1400\text{Hz}/131836\text{Hz} = 0.01$ 程度である。この値は、実用上十分に無視できるという。

周波数ホッピングと組み合わせ

MC-CDMA技術は、OFDMにCDMAを組み合わせて、隣接セルにおける同一周波数の利用を可能にするが、ほかにも同様の効果が得られるOFDMの拡張手法がある。それが、米Flarion Technologies Inc.が開発した「flash-OFDM」である⁶⁾。

flash-OFDMは、OFDMで利用する

サブキャリヤを、周波数軸上で素早くホッピングさせる伝送技術である。周波数ホッピング方式のスペクトラム拡散技術を使っているBluetoothに似ている。flash-OFDMでは、ホッピングさせるサブキャリヤを周波数軸上でそれぞれ直交させるように配置する。こうすることで、同一セル内でサービスを受けるユーザー間での干渉を防ぐ。サブキャリヤを

高速に切り替えるので、隣接セルでも同一周波数のサブキャリヤを利用でき、周波数利用効率を高められるという利点がある(図7)。

ただ、隣接セルのユーザーとの間で、短い時間ながらもある一定の確率で干渉が発生する。それを防ぐために、あるサブキャリヤを利用する時間を制限する工夫や、伝送誤りに強い符号化方式

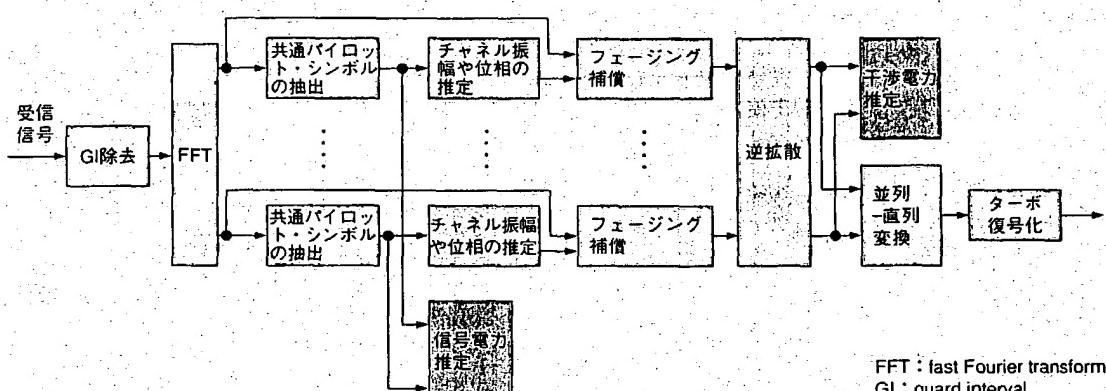


図6 バイロット・シンボルでフェージングを補償
三菱電機が提案するMC-CDMA用受信部の構成図。ドップラー効果の影響を軽減するため、チャネルの振幅と位相の推定をFFT後に実行。チャネル推定には、4つのサブキャリヤのバイロット・シンボルを使う。4つのバイロット・シンボルの受信電力を加算して平均化する。さらに、逆拡散後に得られる既知の拡散系列を用いて、シンボル間での干渉電力を推定する。

OFDMをBWAに 米国での取り組みが盛ん

国内の機器メーカーや大学などの研究者の間では、OFDMを2010年ころの第4世代移動体通信に適用するための技術開発が盛んに進んでいる。一方米国では、現在の移動体データ通信市場に、OFDMを基にした新技術を提案する動きが多い。中でもブロードバンド無線アクセス「BWA (broadband wireless access)」と呼ばれている分野に、OFDMの派生方式を提案する企業が増えている。

BWAは、1つの基地局当たり数百m～数kmと広い範囲にわたって、無線インターネットのサービスを行うもの

である。最大データ伝送速度は事業者によって異なるが、数Mビット/秒程度であり、いわゆる第3世代移動体通信サービスと同程度である。第3世代サービスでは、その基地局整備に莫大な投資が必要になる。それに比べて、BWAの基地局を接続需要の多い地域に限定して広げていくことで、設備投資が低く済むことを強みとする。

MIMO-OFDMに注目

こうしたBWAの市場に向けて、複数の米国のメーカーが提案するのが、MIMO-OFDM (multiple input multiple output-OFDM) 方式である。

MIMO-OFDMは、データの送信時および受信時に、複数のアンテナを使ってデータ通信を行う。1つの通信エリアに複数の基地局を設置する場合もある。これによって、マルチパス干渉によるデータ誤り率の増加を抑制する。また見通しの利かない領域（いわゆるNLOS: non line of sight）における通信も実現しやすい(図A-1)。

例えば米Iospan Wireless, Inc.の「AirBurst」の場合、複数のアンテナを使うことで、2MHzの帯域幅を利用して最大13.6Mビット/秒のデータ伝送速度を実現する。なお1次変調方式はQPSKや16値QAM、または64値QAMを利用する。このほか米Cisco

を盛り込んでいるもよう^{注6)}。1.25MHz以上の帯域幅で、周波数間隔が12.5kHzのサブキャリヤを数百本使い、最大3.2Mビット/秒、平均1.5Mビット/秒のデータ伝送速度を実現する。

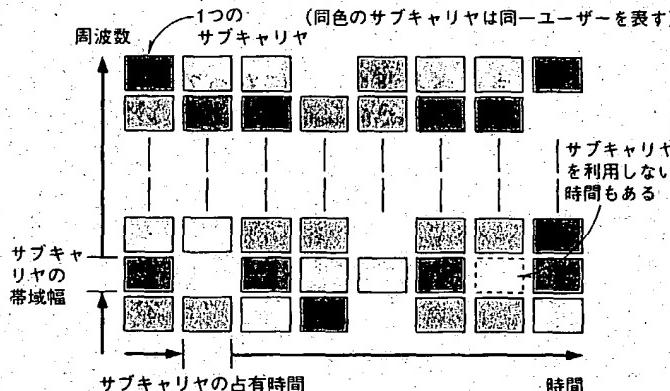
Flarion社はこのflash-OFDMを、現行の第3世代移動体通信サービスが狙っている携帯電話や無線データ通信市場に適用することをもくろむ。それだけでは

ない。無線アクセス・サービス(BWA:broadband wireless access)などにも広く提案していく。QUALCOMM社などが提供する「CDMA2000」などに比較して、既存のIP網をバックボーンに使い、安価なルータなどを基地局に使うことで設備投資コストを抑えられるとする。

例えば、2002年3月18日～20日に米

国フロリダ州オーランドで開催された展示会「CTIA WIRELESS 2002」では、米Ricoh Corp.がflash-OFDM技術を使ってデジカメをインターネット接続する実演を行うなど、屋外でのデータ通信サービスへの適用を強くアピールする。半導体メーカーとも連携し、デジタル家電機器へのflash-OFDM機能搭載も狙うとしている。

図7 周波数ホッピングと組み合わせる「flash-OFDM」は、OFDMで利用するサブキャリヤを、時間軸上でホッピングさせ、切り替えて使う。頻繁に利用するサブキャリヤを切り替えたため、干渉が発生する確率を低減できる。またサブキャリヤを利用しない時間を設けることで、さらに干渉の確率を下げる。1.25MHz～5MHzの帯域幅に対して、数百本のサブキャリヤを配置する。

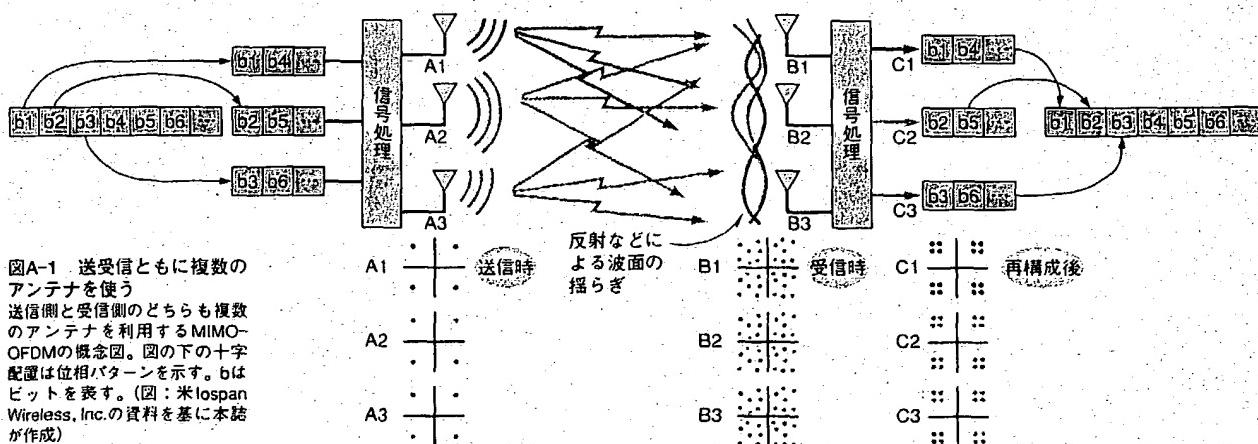


Systems Inc.は「Vector OFDM」という独自方式を提案しており、米Broadcom Corp.が対応LSIを製品化している。

米BeamReach Networks社は、アダプティブ・アレー・アンテナによる空間分割により、同じ周波数を同一エリア内

MIMO技術、そしてOFDMを組み合わせた「Adaptive MultiBeam OFDM」という技術を開発している。アダプティブ・アレー・アンテナによる空間分割により、同じ周波数を同一エリア内

で異なるユーザーが利用できる。これによりユーザーの収容数を、例えば第3世代移動体通信方式の10倍に高められるとする。最大データ伝送速度は1Mビット/秒である。



図A-1 送受信とともに複数のアンテナを使う
送信側と受信側のどちらも複数のアンテナを利用するMIMO-OFDMの概念図。図の下の十字配列は位相パターンを示す。bはビットを表す。(図：米Iospan Wireless, Inc.の資料を基に本誌が作成)

Cover Story

OFDM

第3部

パワー・アンプを制する者が 5GHz帯無線LANを制す

デジタル放送への適用で産声を上げたOFDMは

ここにきて第2の大市場である無線LANですくすくと成長し始めた。

パソコン、周辺機器、AV機器などに

OFDM利用の無線送受信回路が搭載されていく。

そこでは今まで把握できなかった技術課題が、さまざまと浮き彫りになってくる。

案の定、大きな課題が飛び出した。

OFDMはパワー・アンプの消費電流が、すこぶる大きいようなのだ。

オフィスや家庭の無線ネットワークとして定着しつつある2.4GHz帯利用の無線LAN方式「IEEE802.11b」。その勢いを駆って、高速版である5GHz帯利用の無線LAN「IEEE802.11a」[†]に対応する機器が登場してきた。IEEE802.11aはOFDMを変調方式に使うのが特徴だ。

OFDMは、欧州の地上波デジタル放送(DVB)[†]向け機器に最初に導入された。しかし、5GHz帯の無線LANに対する機器メーカーの注目度は放送だけのときよりも桁違いに高まっている。その理由は、5GHz帯無線LANの応用範囲

がパソコンからAV機器まで幅広いだけではない。これから拡大していくOFDM応用製品の実力を引き出す上で、5GHz帯無線LANは格好の「勉強材料」であるからだ。

例えばデジタル放送の場合、端末側で工夫するべき点は受信回路に限られるが、5GHz帯無線LANは、送信回路と受信回路とともにコンパクトに実装する必要がある。消費電力の低減も必須だ。データ伝送速度が最大54Mビット/秒と高速な点でも、より難度が高い^{注1)}。開発で得たノウハウはそのまま、いわゆ

る第4世代の移動体通信システムの研究開発などにつながっていく。

各社のチップが続々登場

IEEE802.11aは、AV(audio visual)機器間での高品質の映像伝送に利用できると期待されている。既にソニーなどが、IEEE802.11a対応の無線アクセス・ポイントやPCMCIAカードの製品化を開始した(図1)。例えば、デジタルHDTV放送のストリームを無線LANで伝送しようとした場合、現状での選択肢はIEEE802.11aにはほぼ限られる^{注2)}。将

† IEEE802.11a=米国の標準化団体IEEEが1999年9月に規定した5GHz帯利用の無線LAN方式。NTTと米Lucent Technologies Inc.が共同で提案した技術をベースしている。変調方式にはOFDMを利用している。1次変調方式はBPSK、QPSK、16階QAM、64階QAMの4種類から選択できる。サブキャリア数は62で、そのうちハーフドット・シンボルは4つ。誤り訂正方式には符号込み符号化とビタビ復号化を用いる。標準の伝送レートは6M/12M/24Mビット/秒で、オプションの伝送レートは9M/18M/36M/48M/54Mビット/秒である。国内では5.15GHz~5.25GHzの100MHzの帯域幅に、20MHz間隔で4チャネルを配置して使う。国内では電波委員会が「ARIB-STD-T71」として標準化している。

† DVB(Digital Video Broadcasting)=欧州のデジタル放送の規格。規格化を推進する標準化団体の名前としても用いられる。地上波デジタル・テレビ放送向けの仕様がDVB-Tである。ここではOFDMを変調方式に利用する。

注1) 5GHz帯無線LANでは、さらにデータ伝送速度を高めることができる技術提案もある。最大72Mビット/秒や、108Mビット/秒を実現する。例えば、米Proxim Inc.は、通常の20MHz幅のチャネル帯域を2つ束ねて利用する手法などで、最大データ伝送速度を108Mビット/秒に高めたminiPCIカード型のIEEE802.11aモジュールを発売している。

注2) デジタルHDTV放送を家庭内に無線で伝送する技術提案としては、このほかに「HyperLAN/2」や、「Wireless 1394」などがある。いずれも物理層にはOFDMを使っており、最大データ伝送速度が数十Mビット/秒と高い。

来のヒット商品として期待が高まる壁掛けテレビ受像機に、DVDの次世代光ディスクを使う録画再生機やセットトップ・ボックスをケーブル無しでつなごうとすれば、IEEE802.11aを使わざるを得ない。こうした機器メーカーのニーズに応えようと、IEEE802.11a対応の5GHz帯無線LANチップセットの開発競争も一段と熱を帯びている。

IEEE802.11a用チップセットを2001年9月に一番乗りで発売したのは、米Atheros Communications, Inc.である⁽³⁾。出荷が早かっただけではない。ベースバンド処理からRFトランシーバ回路まですべてをCMOS技術で実現したという話題性も加わり、圧倒的な注目を集めた。米Intel Corp.やソニー、TDKが製品に採用するなど、実績も着実に積みつつある⁽⁴⁾。

一方で「Atheros社の活躍は、あくまで第1ラウンドにすぎない」とばかりに、これまで同社の独走を許していた半導体メーカーが、続々と対応LSIの開発/製品化を明らかにしている（表1）。例えば海外ではイスラエルEnvira Inc.、カナダIceFyre Semiconductor, Inc.、米Intersil Corp.、米Magis Networks, Inc.などである。そして国内では松下電器産業、NTT、東芝などが開発を表明する。NEC、三洋電機、シャープやソニーなども、明言こそしないものの、水

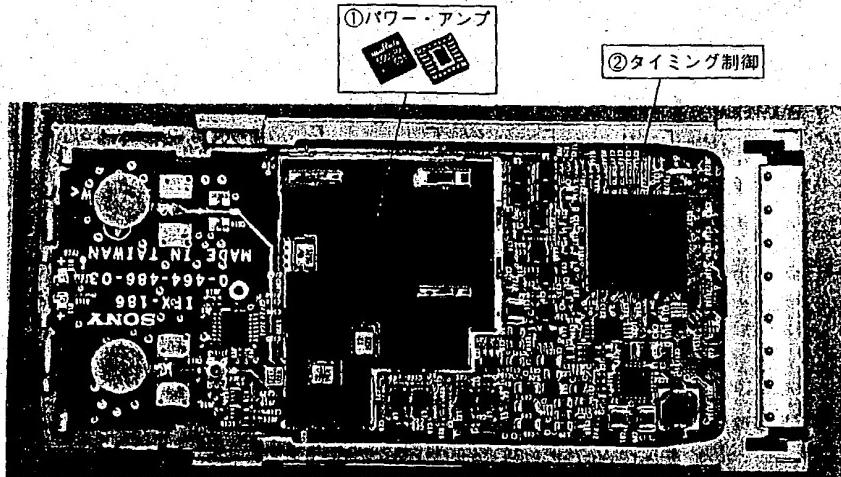


図1 無線回路の課題はパワー・アンプ
5GHz帯利用の無線LAN方式「IEEE802.11a」に向けたチップセットの登場を受けて、AV機器や情報機器メーカーの開発が熱を帯びている。しかし、チップセットを買ってくれば同方式の無線回路ができるわけではない。幾つか課題を克服する必要がある。例えば①低消費電力化に向けたパワー・アンプ回路設計、②送受信のタイミング制御などである。なお、パワー・アンプはシールド内に実装されている。

面下で対応チップセットの開発に手を染める⁽⁵⁾。

消費電流が500mAを超える

LSIメーカーが激しいばぜり合いを演じる中、無線機器を開発する技術者の多くが、ある大きな課題に悩んでいる。5GHz帯無線LANモジュールの消費電流が非常に大きいのである。「送信時で、今のIEEE802.11b[†]モジュールの2倍に相当する500mA程度を消費する⁽⁶⁾。このままではノート・パソコンへの内蔵には向かない。AV機器などへの搭載にはさらにその1/5程度まで消費電力を減らす必要がある」（国内のある無線LAN

モジュール・メーカーの担当者）。

消費電流を増やしている「主犯」はパワー・アンプである。現時点で同モジュールを作るには、GaAs技術で製造する個別部品のパワー・アンプをチップセットに外付けする必要がある。この外付けパワー・アンプの消費電流が大きい。実装手法や機能の盛り込み方によって差異はあるものの、モジュール全体の消費電流の半分程度を占めるのは確実だ。「500mA中、300mAはパワー・アンプが消費している」（5GHz帯無線LAN向けパワー・アンプを製造する村田製作所の担当者）という声すらある。

実は当初機器メーカーはここまで消

注3) Atheros社は、2000年9月に米国で開催された展示会「NetWorld+Interop 2000 Atlanta」でチップセットを初出展した。その後2001年春からチップセットのサンプル出荷を開始していた。

注4) TDKは、Atheros社のチップセットを使ってPCM-CIAカードを開発しているが、製品化にはまだ至っていない。

注5) これらのメーカーは、IEEE802.11aに限らず、HiperLAN/2やWireless 1394向けチップセットの開発も行っている。

[†]IEEE802.11b=米国の標準化団体IEEEが規定した2.4GHz帯利用の無線LAN方式。Intersil社などが開発したCCK（Complementary Code Keying）と呼ばれる調制方式を利用し、最大11Mビット/秒のデータ伝送速度を実現している。

注6) このモジュール・メーカーによれば、IEEE802.11b用の送受信モジュールの消費電流は、送信時が300mA~350mAで、受信時が200mA~230mAだという。なお、スリープ・モードに設定すれば120mA程度に下げられるとしている。

Cover Story

消費電流が大きくなるとは予測していなかった。市場に最初に登場したAtheros社の5GHz帯無線LAN向けチップセットは、CMOS技術で製造したRFトランシーバLSIにパワー・アンプも集積しており、外付けのパワー・アンプを使わずに済むとしていたからだ。このため消費電流を低減できるはずだった。

「内蔵のアンプでは足りない」

ところが、実際は違った。Atheros社のチップセットを利用する国内モジュール・メーカー担当者は「残念ながら、外付けパワー・アンプは必須である。内蔵のモノだけでは絶対に済まない」と断言する^{注7)}。

このモジュール・メーカーは、2002

年後半に5GHz帯無線LANの送受信モジュールを国内機器メーカーに納入する予定で開発を進めている。そこで、現在最も市場に出回っていて手に入りやすいAtheros社のチップセットを選んだという。Atheros社はパワー・アンプを集積していることを強みとしていたため、当初は外部にパワー・アンプが不

表1 5GHz帯利用の無線LANに向けたチップセットの例

	米Atheros Communications, Inc.			米embedded wireless devices, inc.	イスラエルEnvaria Inc.
名称(または開発コード名)	AR5001	AR5001X	AR5001A	e8024	WiND
種類	IEEE802.11a用チップセット	IEEE802.11a/b/g対応のコンボ型チップセット	IEEE802.11a用チップセット	IEEE802.11a/b/HiperLAN/2、Bluetooth、HomeRF、DECTに対応するベースバンド・チップ	IEEE802.11a/b/g対応のコンボ型チップセット
構成	MAC処理/ベースバンド処理用LSIと、RFトランシーバLSIの2チップ	MAC処理/ベースバンド処理用LSIと、2.4GHz帯用RFトランシーバLSI、および5GHz帯用RFトランシーバLSIの3チップ	MAC処理/ベースバンド処理用LSIと、RFトランシーバLSIの2チップ	MAC処理/ベースバンド処理用LSIのみの1チップ	MAC処理/ベースバンド処理用LSIと、RFトランシーバLSIの2チップ
パワー・アンプの有無	RFトランシーバLSIに集積	RFトランシーバLSIに集積	RFトランシーバLSIに集積	含まず	含まず
付加機能や概要など	米Intel Corp. やソニーなどの無線LAN製品に採用実績がある。	128ビットの暗号化方式「AES」に対応するほか、TKIPとWEP機能を備える。MAC処理の拡張仕様のIEEE802.11eおよび、TPCとDFSに対応しIEEE802.11hにも準拠した。	AESに対応、MAC処理の拡張仕様IEEE802.11eおよび、TPCとDFSに対応しIEEE802.11hに準拠した。電池駆動時間を、IEEE802.11bに比べて35%長くできる。	32ビットのマイクロプロセッサと、32ビットの固定小数点型DSPを集積、VoIP用音声符号化プロトコル(G.711、G.723、G.726)に対応。	AESに対応、MAC処理の拡張仕様IEEE802.11eおよび、TPCとDFSに対応しIEEE802.11hに準拠した。消費電力は送信時が1750mW、受信時が1250mW(パワー・アンプを含む)。RFチップは0.5μmのSiGe技術で、ベースバンドは0.18μmのCMOS技術で製造。
出荷時期	量産出荷中	2002年第2四半期の量産出荷を予定	2002年第2四半期の量産出荷を予定	2002年第1四半期のサンプル出荷を予定	2002年第3四半期からサンプル出荷を予定
最大データ伝送速度(Mビット/秒)	72	108	108	54	54
公表価格	35米ドル	未公表	未公表	1000個購入時に20米ドル	10万個購入時に30米ドル以下を予定

AES : Advanced Encryption Standard

DFS : dynamic frequency selection

TKIP : temporal key integrity protocol

TPC : transmit power control

注7) Atheros社では「米国向けに設計しているため、パワー・アンプの出力は低く設定してある。そのため国内で発売する際に、外付けのパワー・アンプが必要になる」としている。

要と考えていた。

しかし、サンプル品を使って性能評価を繰り返したところ、出力が全く足りないことが分かった⁽⁸⁾。「送信出力として+22dBmが必要だったが、そこまでの出力を得られなかった」。このため、国内の部品メーカーが供給するGaAs製のパワー・アンプを外付けで利用する形

に設計変更した。

外付けのパワー・アンプを利用せざるを得なくなったのは同社だけではない。既に5GHz帯利用のPCMCIAカードを製品化したソニーも、内部に村田製作所のパワー・アンプを実装している(図1)⁽⁹⁾。実は、このパワー・アンプに高い出力が必要になることこそが、

OFDMを採用した通信方式に共通して発生する実装上のポイントなのである。

直線性への要求値が高い

OFDMは送信回路のパワー・アンプに対する要求が非常に厳しい通信方式である。それは、OFDMの送信出力波形に起因している。

	カナダIceFyre Semiconductor, Inc.	米Intersil Corp.	米Magis Networks, Inc.	松下電器産業	NTT	スウェーデンSpirea AB	英Synad Technologies Ltd.
	—	Prism Indigo	Air5	MN86713-H	—	TripleTraC	Mercury5G
IEEE802.11aおよびHiperLAN/2に対応するチップセット	IEEE802.11aおよびHiperLAN/2に対応するチップセット	5GHz帯無線向けチップセット	IEEE802.11aに対応するベースバンド・チップ	IEEE802.11aに対応するベースバンド・チップ	IEEE802.11aおよびHiperLAN/2に対応するチップ	IEEE802.11a/bのコンボ型チップセット	
MAC処理用LSIと、ベースバンド処理用RFトランシーバLSIの2チップ	MAC処理/ベースバンド処理用LSI、1.2GHzのIF用LSI、RFトランシーバLSI、SiGe製パワー・アンプ	MAC処理/ベースバンド処理用LSIと、IF用LSI、RFトランシーバLSI(独自方式のMAC処理手法を採用)	MAC処理/ベースバンド処理用LSI	MAC処理/ベースバンド処理用LSIと、IF用LSI(RFトランシーバLSIを含む)	2.4GHz帯および5GHz帯に対応したRFトランシーバLSI	MAC処理/ベースバンド処理用LSIと、RFトランシーバLSIの2チップ	
RFトランシーバLSIに集積	SiGe製のパワー・アンプを含む	含まず	含まず	含まず	含まず	含まず	含まず
ベースバンド処理回路で、信号出力を調整し、消費電流を270mA程度に削減する。	ベースバンド処理LSIに、英ARM Ltd.のCPUコアや、2MビットのSRAMを集積。	欧州の高速無線LAN方式「HiperLAN/2」を簡略化した独自方式のMAC処理回路を集成。	12ビットのA-D/D-A変換器を集成。	ベースバンド処理LSIに、英ARM Ltd.のCPUコアを内蔵。	消費電流はデータ送信時間が40mA、5GHz帯の受信時間が50mA、2.4GHz帯の受信時間が40mA。0.18μmルールのCMOS技術で製造。	AESに対応。TPCとDFSにも対応した。受信回路のアーキテクチャはダイレクト・コンバージョン。5GHz帯と2.4GHz帯で利用するLNAを別に持つ。0.18μmルールのCMOS技術で製造。	
2002年第2四半期	未定	2002年第3四半期	サンプル出荷中	未定	2002年第2四半期からサンプル出荷し、2002年第4四半期から量産出荷を予定	2002年第2四半期のサンプル出荷を予定	
54	54	54	54	36	108	54	
未公表	10万個購入時に35米ドル	未公表	サンプル価格は8000円	未定	未公表	1万個購入時に32米ドル	

WEP : wired equivalent privacy

注8) このメーカーが測定した結果では、+4dBm程度だったという。ほかのモジュール・メーカーも同様の測定結果を得ているよう。

注9) 高い出力を得るために、パワー・アンプを3段に接続しているという。

Cover Story

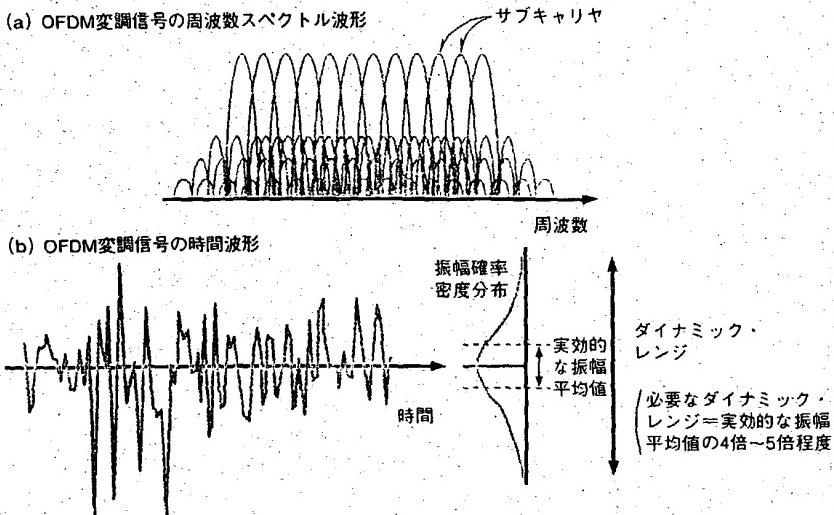
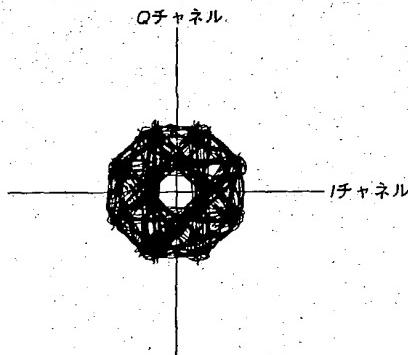


図2 ダイナミック・レンジが大きい
OFDM変調によるスペクトル波形は、多数の波形の重ね合わせとなる(a)。このため信号波形の振幅値が、大きく揺れ動く。時間軸上で信号波形を見ると、振幅の平均値に対する最大/最小値のダイナミック・レンジが大きい(b)。OFDM変調波を扱うパワー・アンプは、こうした広いダイナミック・レンジの全域にわたって、増幅時の線形性を維持しなければならない。(図:NTTの資料を基に本誌が作成)

OFDMは多数のサブキャリヤの波を合成して送信波形を形成する。これらのサブキャリヤの位相がたまたま一斉にそろってしまうと、極めて大きなピーク出力が発生する(図2)。つまり、変調信号の出力の平均値に比べて、そのピーク出力までのダイナミック・レンジが非常に大きくなってしまう(図3)。「出力信号の最大値と平均値との比率(PAPR:

peak-to-average power ratio)は13dB程度まで高まることがある。OFDM以外の通信方式なら、せいぜい数dB程度で収まるのに…」(NTTアクセスサービスシステム研究所 ワイヤレスアクセスプロジェクト構内系アクセスグループリーダー主幹研究員の守倉正博氏)。しかも、こうした広い振幅の全域にわたって、パワー・アンプの出力の直線性を

(a) $\pi/4$ シフトQPSKの場合



(b) OFDMの場合

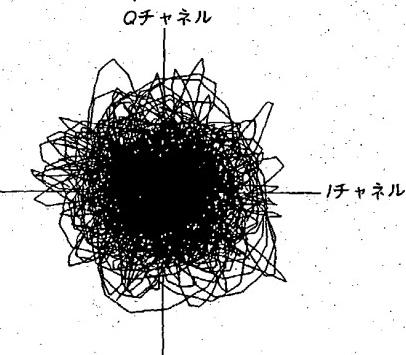


図3 平均電力から13dB高いことも

OFDM変調波と、 $\pi/4$ シフトQPSK変調波の直交座標系における信号出力値を示した(いわゆるI-Qコンスタレーション図)。この場合Iが同相成分でありQが直交成分である。(a)の $\pi/4$ シフトQPSKの場合、信号点の平均値との幅が一定である。それに対して(b)のOFDM変調波では、信号点の平均値から最大値までの幅が大きい。平均値から13dB程度も高くなることがあるという。図は三菱電機のシミュレーション結果である。

維持しなければならない。

「例えば平均出力が10mWの場合、パワー・アンプとしては50mW程度まで直線性を維持できる製品が必要になる」(NTTの守倉氏)。つまり最大出力として平均出力の5倍も要求される。こうしたアンプは一般に効率が低い。平均出力の割には、消費電力が大きくなってしまう。さらに、パワー・アンプの部品コストがかさみ、送受信モジュールの価格低減を難しくさせている。

移動体通信でも課題に

こうしたパワー・アンプの難しさは、OFDM変調方式が本質的に抱えているものだ。これをどうにかしないと、OFDMの利点を素直に生かせない。例えば移動体通信に向けマルチキャリヤCDMA技術の研究開発を進める三菱電機も、「送信側のパワー・アンプに高い線形性が要求されるという点は大きな課題だ。正直まだそこまで手が回っていない状況だが、今後何らかの手法により解決しなければ、端末や基地局の低消費電力化が著しく困難になるだろう」(同社情報技術総合研究所無線伝送部主事の佐野裕康氏)と指摘する。

OFDMはそのマルチキャリヤ伝送という特性から、携帯電話や無線LANなど、複数の通信方式を1つのベースバンド回路で実現する手法としても期待さ

*マルチキャリヤCDMA=OFDM変調方式にCDMA技術を組み合わせた方式。OFDMの特徴マルチパス干渉強度と、CDMAの特徴乱数コードの優位性を並ね備えることを指す。

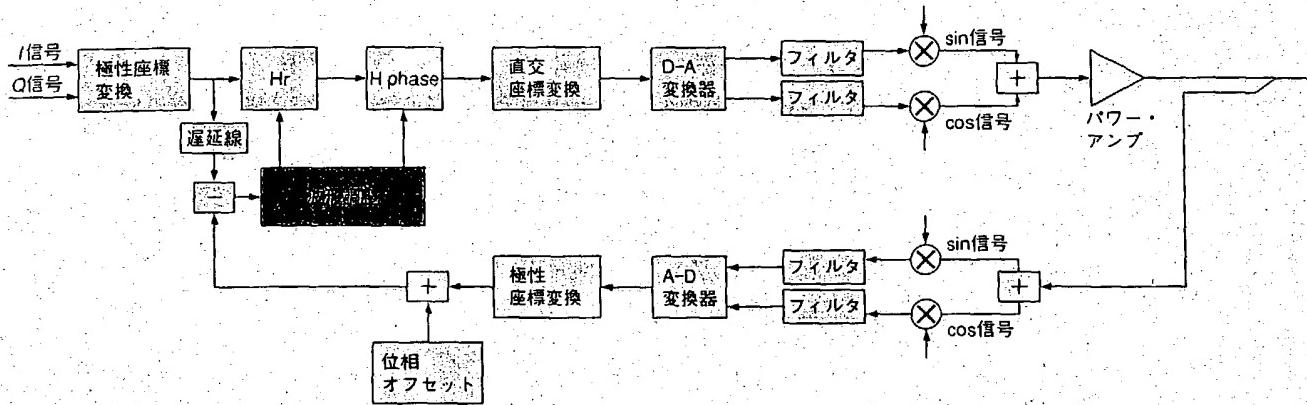


図4 パワー・アンプに入力する波形を調整

カナダIceFyre Semiconductor, Inc.は、OFDM変調信号の波形を調整することで、パワー・アンプに求められる直線性の特性を緩やかにしているという。図は、同社が一部に公開した資料を基に本誌が作成したもの。まだ不明な点が多いが、パワー・アンプの出力信号を利用して、フィードバック制御するのが特徴である。

れている（p. 127の「OFDM送受信機の共用化へ、ソフトウェア無線に近いアプローチも」参照）。しかしこのパワー・アンプの課題により、そうした技術進歩が阻害される可能性すらある。

アンプ入力の前に波形を調整

実は海外の半導体ベンチャーの間では既に、このパワー・アンプの課題に取り組んでいるメーカーがある。それがIceFyre社である^[注10]。「IceFyre社の提案技術を使えば、CMOS回路で製造したパワー・アンプでも十分いけそう。5GHz帯無線LANの1チップ化も実現できるのでは」（国内のモジュール・メーカーの担当者）と期待を集めている。

IceFyre社もAtheros社同様に、CMOS技術で製造するRFトランシーバLSIに

パワー・アンプを内蔵した。パワー・アンプに入力する前段階の信号波形を調整することで、PAPRを0dBまで低減できたためだ^[注11]。

IceFyre社は実現手法などを明らかにしていないが、OFDM信号の波形を「歪み抑制制御」やフィードバック制御などにより調節しているようだ。スイッチングによってパワー・アンプのバイアス電圧の制御も行っている。こうした手法を組み合わせることで、パワー・アンプにそれほど高い線形性を要求せずに済むようにした（図4）。実際、同社のチップセットは、動作時の消費電流が270mA程度に収まるという。

現在のところ、パワー・アンプの直線性への要求を低減する工夫を盛り込むと発表している半導体メーカーは、



図5 伝送距離を長くできることを主張するメーカー

米Magis Networks, Inc.は、約50m離れても30Mビット秒前後のデータ伝送速度を維持できると主張する。既にHDTV信号を50m伝送する実演などを米国の展示会などで披露済みである。ただし、伝送距離を延ばせる理由などは明らかにしていない。

IceFyre社のみである。しかしそのほかにMagis社も同様の工夫を盛り込んでいることを示唆する。「パワー・アンプの直線性の問題はよく認識している。具体的なことは言えないが、当社のLSIではその課題への対策を盛り込んで

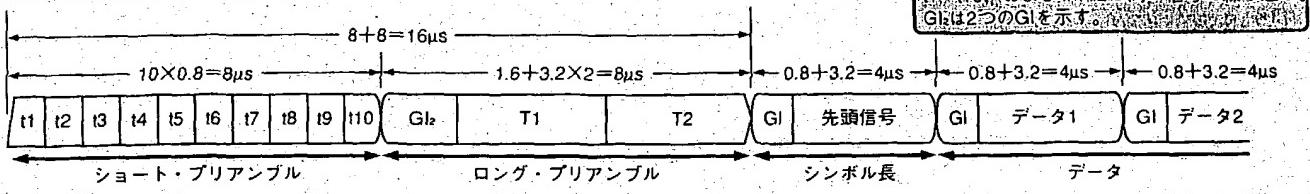
注10) 本誌pp. 129-138に関連記事あり。

注11) PAPRは、IEEE802.11aの場合、一般に12dB～14dB程度あるという。

← ICE は、
無線 LAN. 放送、移動体
基地局用の
「大出力 OFDM
全帶域 AMP」に
全力 ~~電力~~ を結集すべき
と覺りが
二階堂
024.18
和洋

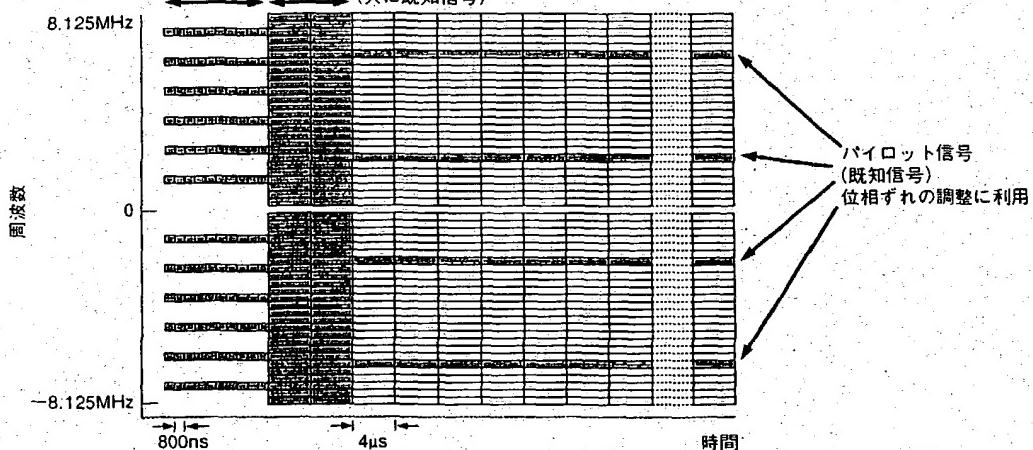
Cover Story

(a) IEEE802.11aのパケット構成



(b) 時間軸と周波数軸で見たときの様子

ショート・ロング・
ブリアンブル (共に既知信号)



11～110番目およびT1/T2は同一信号の繰り返し。
GIは2つのGIを示す。

GI : guard interval

図6 NTTのシンボル・タイミング同期手法
NTTのタイミング同期手法では、パケットの先頭に配置したショート・ブリアンブルと、ロング・ブリアンブルの境目を把握することで、後に続くシンボルとの同期を取り(a)。ショート・ブリアンブルとロング・ブリアンブルはいずれも既知の信号列であり、長さは8μs。ショート・ブリアンブルはすべてのサブキャリアでなく、52本のうちの12本に存在する(b)。

る」(同社 Executive Vice President の Pete Fowler氏)。

Magis社は、伝送距離を長くしても、データ伝送速度を高い値に維持できることも強みとしている(図5)。国内メーカーからの評価も高まっており、日立製作所など3社の国内家電メーカーがMagis社への出資を行っている。「いろいろ試したが、今のところMagis社のチップセットが、動画伝送向けには最有力だ」(松下電子部品のモジュール開発

担当者) という声もある^{注12)}。

Atheros社も手をこまねいているわけではない。IEEE802.11b向けチップセットより消費電流が35%低いというチップセットを2002年第2四半期からサンプル出荷している²⁾。送信出力も、外付けのパワー・アンプが不要になる程度の値を十分得られるという。こうした海外メーカーの活躍によって、5GHz帯無線LAN向けLSIの低消費電力化競争は一気に佳境を迎えている^{注13)}。

タイミング確保がLSIの選定に

5GHz帯無線LANの機器開発で浮上している課題はパワー・アンプだけではない。もう1つの大きな課題が、受信回路におけるシンボル同期タイミングの確保である。

OFDMは、周波数や位相の同期を確保するのが難しい。これは特にIEEE802.11a対応機器では開発の焦点となる。IEEE802.11a仕様で規定しているのは、変調方式や誤り訂正方式、送信波形や

注12) Magis社は、2003年第1四半期にベースバンド処理回路をIPコアとして供給する予定にしている。

注13) 5GHz帯無線LAN機器を開発する上での課題としてはこのほか、アンテナの問題がある。デジタルHDTVのような高画質の映像を無線でやりとりするには、瞬間的な伝送誤りさえ許されなくなる。通常のIEEE802.11a向けアクセス・ポイントやPCMCIAカードでは、アンテナを2つ備えるダイバーシティ・アンテナを利用しているが「3個～4個のアンテナが端末側にも必要になりそうだ」(松下電子部品)との声が出ている。

注14) パケット・フォーマットやシンボル長などへの変更は加えていないため、ほかのLSIとの相互接続性は保たれている。

送信データのパケット構成などに限られており、受信時の同期確立の手法は、それぞれのメーカーの実装に委ねられている。逆に言えば、同期を素早く、少ない回路規模で確立できるLSIは、他社の製品に比べて優位性があるということがある。

例えばNTTアクセスサービスシステム研究所が開発したIEEE802.11a向けLSIでは、シンボル同期手法に工夫を盛り込んでいる。一般にIEEE802.11aでは、パケットの先頭部分に当たる2つの

データ列（ショート・プリアンブルとロング・プリアンブル）の境を把握することで、後に続くシンボルのタイミングと同期する（図6）。この際に、同一の既知信号を繰り返し使うが、この既知信号を把握するアルゴリズムを高速にすることで、同期処理に必要な時間を削減した^[14]。

この結果、動作時の消費電流を減らすことができたという。具体的な消費電流の値は明らかにしていないが、「例えば当社のLSIを使ったPCMCIAカードで

は、ノート・パソコンで映画1本分に当たる2時間の動画ストリーミングを無線で受信しても、十分に2次電池を持たせることができる」（NTTの守倉氏）という。NTTは国内メーカーと協力して、開発したLSIを外販する予定だ。

参考文献

- Wight, J., "Signal Manipulation for 5-GHz OFDM," *Wireless Systems Design Conference 2002*, Feb. 2002.
- 米Atheros Communications, Inc.の発表資料は、<http://www.atheros.com/news/second-generation.html>
- 坂田ほか、「IEEE802.11a準拠高速無線LAN用チップセットの開発」、「2002年電子情報通信学会総合大会講演予稿集」、B-5-249、2002年3月。

OFDM送受信機の共用化へ ソフトウェア無線に近いアプローチも

変調方式にOFDMを使う通信システムが増えるにつれて、複数のサービスに1台で対応できる「共用端末」を実現したいというニーズが広がっていく。この共用化を実現する方法は2つに大別できる。1つは、通信システムの仕様自体を、あらかじめ共用化を前提に決めておく方法である。例えば、新しい無線LAN方式を決める際に、一部のサブキャリアだけを別の通信システムでも使えるようにしておけば、1つのLSIで両サービスに対応する共用端末を開発できる。

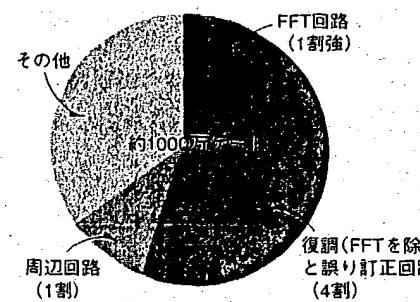
もう1つは、同じOFDMでも、全く別仕様の通信システム同士の共用を実現する方法だ。この場合、共用できる可能性が高いのは、ベースバンド処理LSIに搭載したFFT回路である。例えば大規模なFFT回路をワイヤド論理回路で用意しておき、通信システムごとに異なる部分、すなわち同期処理や

エンタリープ処理については、DSPコアなどで実行する方法が考えられる。いわゆる「ソフトウェア無線」に近い処理方法を探る。

こうした共用化のニーズが真っ先に表面化する可能性が高いのは、無線LANと地上波デジタル放送とみられている。しかし、実際に開発されたそれぞれの用途のLSIを見てみると、いず

れもFFT回路の規模は全体の1割程度にすぎない（図A-1）。つまりFFT回路を共用してもそれほど大きな利点にならない。無線LANと地上波デジタル放送の共用化のみが目的ならば、それぞれの方式の処理回路を別に用意して1チップ化した方が現実的なようだ。ソフトウェア無線に近い処理が共用端末の実用化の決め手になるのは、OFDMを使ったさらに多くのサービスに1台で対応する必要が出てきたときになるだろう。

(a) 地上波デジタル放送受信用LSI



図A-1 FFT回路は約1割しかない

松下電器産業が開発した地上波デジタル放送受信用ベースバンド処理LSIと(a)、5GHz帯を利用する無線LAN向けベースバンド処理LSIについて(b)、LSI内部の大まかな構成を示した。以前はOFDM実用化の大きな課題となっていたFFT回路は、LSIの微細化が進んだ今、約1割を占めるにすぎない。

(b) 5GHz帯利用の無線LAN向けLSI

